



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**VYUŽITÍ BIOLOGICKÝCH STRATEGIÍ ŽIVOČICHŮ PRO  
SNÍŽENÍ HLUKU VOZIDEL**

USE OF ANIMAL BIOLOGICAL STRATEGIES TO REDUCE VEHICLE NOISE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Gergő Kovács**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.**

**BRNO 2021**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Gergő Kovács**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Využití biologických strategií živočichů pro snížení hluku vozidel

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Některé živočišné druhy postupným vývojem dokázaly vypracovat strategie omezující vznik hluku. Příkladem mohou být sovy, které v důsledku tvaru křídla i tvaru jednotlivých per dokážou značně omezit vznik hluku při letu. Práce se zabývá možnostmi využití biologických strategií živočichů pro snížení hluku vozidel. Hlavní důraz je kladen na přenesení těchto strategií pro řešení technických problémů v oblasti vibrací a hluku vozidel.

### Cíle bakalářské práce:

Rešerše biologických strategií živočichů pro snížení hluku.  
Analýza možných aplikací biologických strategií u vozidel.

### Seznam doporučené literatury:

DE SILVA, Clarence W. Vibration and Shock Handbook. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2005. ISBN 978-0-8493-1580-0.

SMETANA, Ctirad. Hluk a vibrace. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.

KUN, CH., L. QINGPING, L. GENGHUA, Y. YING, R. LUQUAN, Y. HONGXIU a CH. XIN. The Sound Suppression Characteristics of Wing Feather of Owl. Journal of Bionic Engineering. 9(2), 2012, ISSN 1672-6529.

CLARK, I. A., C. A. DALY, W. DEVENPORT, W. N. ALEXANDER, N. PEAKE, J.W. JAWORSKI a S. GLEGG. Bio-inspired canopies for the reduction of roughness noise. Journal of Sound and Vibration. 385. 2016. ISSN 0022-460X.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Táto bakalárská práca sa zaoberá s využitím biologických stratégií živočíchov pre zníženie hluku vozidiel. Najskôr sú objasnené základné pojmy akustiky a spomínané príčiny hluku v automobile. Podstatná časť je venovaná podrobnejšiemu rozoberaniu jednotlivých zvierat a ich techník. Hlavným cieľom práce je analyzovať mieru zníženia hluku týchto stratégií a ich potenciálne využitie v doprave, konkrétne v automobiloch.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

Znižovanie hluku, prúdenie vzduchu, aerodynamický hluk, krídla sov, koža žralokov.

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the use of biological strategies of animals to reduce vehicle noise. First, the basic concepts of acoustics and the mentioned causes of noise in a car are clarified. A substantial part is devoted to a more detailed analysis of individual animals and their techniques. The main goal of this work is to analyze the noise reduction rate of these strategies and their potential use in transport, specifically in cars.

## KEYWORDS

Noise reduction, airflow, aerodynamic noise, owl wings, shark skin.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

KOVÁCS, Gergő. *Využití biologických strategií živočichů pro snížení hluku vozidel*. Brno, 2021. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 44 s. Vedúci práce doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D..

## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením doc. Ing. Pavla Novotného, Ph.D. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 21. 5. 2021

.....

Gergő Kovács

## POĎAKOVANIE

PodĎakovanie v prvom rade patrí vedúcemu bakalárskej práce, doc. Ing. Pavlovi Novotnému, Ph.D. za odborné vedenie, pomoc, cenné rady a pripomienky pri vypracovaní tejto práce. Ďalej by som sa chcel poďakovať mojim rodičom za podporu počas celého štúdia.



## OBSAH

<b>Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Akustika.....</b>	<b>11</b>
1.1 Zvuk .....	11
1.2 Hluk .....	11
1.3 Akustické veličiny .....	12
1.4 Hladina akustických veličín .....	13
1.5 Účinky hluku na člověka .....	14
1.6 Zdroje hluku osobních vozidel .....	15
<b>2 Bionika.....</b>	<b>17</b>
2.1 Křídla sov.....	17
2.2 Nábežná hrana.....	18
2.3 Zadná hrana.....	22
2.4 Redukce šumu inspirovaná pórovitým materiálem .....	25
2.5 Kůže delfínů a žraloků .....	26
2.6 Tvary čela mořských levů .....	33
<b>3 Zhodnotění a využitelnost' .....</b>	<b>35</b>
<b>Závěr .....</b>	<b>38</b>
<b>Použité informační zdroje .....</b>	<b>39</b>
<b>Zoznam použitých skratiek a symbolov .....</b>	<b>44</b>

## ÚVOD

Samotný hluk je prirodzene sa vyskytujúci jav, ktorý môže pochádzať od ľudskej alebo inej živej bytosti z prírody. Nad určitou hranicou však už negatívne ovplyvňuje zdravie a psychiku človeka, a preto sa oplatí tomu venovať. V minulosti tento jav nevyžadoval až takú pozornosť, ale teraz, keď má takmer každý nejaký druh dopravného prostriedku, a sme s nimi schopní prekonať väčšie vzdialenosti, stupeň hlukového znečistenia výrazne zvýšil. Práve to môže z dlhodobého hľadiska spôsobiť nepríjemnosti v prírode pre živé bytosti, ľudí v mestách s väčším počtom obyvateľov, alebo aj pre jednotlivca cestujúceho s nejakým druhom dopravného prostriedku.

Najvýznamnejším zdrojom hluku vo vozidlách sú napríklad spaľovacie motory, pneumatiky, alebo samotná karoséria, okolo ktorého prúdi vzduch, aj keď na mieru produkcie hluku vplýva aj rýchlosť vozidla. V dnešnej dobe je používanie materiálov na znižovanie hluku rozšírené a v mnohých krajinách sa objavili zákony, nariadenia a normy, ktoré chránia ľudí pred nadmerným hlukom.

Ak dokážeme aby sa minimalizoval hluk vydávaný vozidlom, vylúčil by sa tak aj dôležitý zdroj zvukových signálov čo umožňovalo ostatným účastníkom dopravy vnímať blízkosť dopravného prostriedku, a na ktoré bolo zvyknuté niekoľko generácií. Na druhej strane, keby sa výrazne znížila úroveň hlasovej komunikácie medzi účastníkmi dopravy, vodiči by museli venovať zvýšenú pozornosť svojim vizuálnym schopnostiam. To môže dokonca viesť aj k problémom v bezpečnosti premávky, napríklad pri spozorovaní vozidiel záchranných jednotiek je bežné, že ich najskôr vnímame zvukom.

S rastúcou prevalenciou elektrických vozidiel sa ukázalo, že v porovnaní s vozidlami so spaľovacím motorom došlo k výraznému zníženiu úrovne hluku z hľadiska hluku motora. Pri takej dôležitej úlohe, ako zníženie hluku vznikajúcu kontaktom pneumatík s vozovkou a generovanú prúdením vzduchu, môže vzniknúť taká nízka hladina, čo by viedlo stúpaniu počtu dopravných nehôd medzi vozidlami alebo medzi vozidlom a chodcami. V takýchto prípadoch je dôležité aby sme uznali, že zníženie hluku musí prebiehať primeranom rozsahu a v kvalite.

Táto bakalárska práca sa snaží odpovedať na otázku, do akej miery sú tieto stratégie schopné znížiť hluk a kde by sme ich mohli v budúcnosti vo vozidlách použiť.

# 1 AKUSTIKA

Akustika je fyzikálna a technická oblasť, ktorá sa komplexne zaoberá zvukom a jeho formovaním, súvisiace s vibráciami, šírením v plynoch, kvapalinách a pevných látkach a ľudským vnímaním. Z jeho poddisciplín existuje rôznych, napr. hudobné akustika, ktorá skúma fyzikálne základy hudby a hudobných nástrojov, stavebné akustika, ktorá zvukové javy a súvislosti v uzavretom priestore, budovách a stavbách, priestorová akustika šírenie zvuku vo všeobecnom priestore, fyziologická akustika vznikom zvuku v hlasovom orgáne človeka atď. [1] [2].

## 1.1 ZVUK

Je nám známe, že mechanický systém pozostávajúci zo vzájomne prepojenej hmoty a pružiny môže ukladať mechanickú energiu vo forme potenciálnej a kinetickej energie. Ak je systém vzrušený vonkajšou silou, bude reagovať pohybom. Keď je sila vylúčená, uložená energia spôsobí osciláciu systému - systém sa bude pohybovať periodicky. Pre spomínaný jednoduchý systém bude voľný pohyb prebiehať iba na jednej frekvencii; hovoríme tomu rezonančná frekvencia. Hovoríme, že systém rezonuje a pokiaľ v systéme nedôjde k tlmeniu, bude systém pokračovať v kmitaní s rovnakou amplitúdou navždy. Tlmenie sa prejaví vždy, keď sa energia odstráni z oscilačného systému. Trenie a žiarenie sú dva procesy, pomocou ktorých je možné energiu z vibračného systému odstrániť. Trenie, tiež vnútorné, vedie k transformácii energie z pohybu na teplo. Vyžarovanie zvukových vln je dôležitý spôsob, ktorým môže mechanický systém stratiť energiu. Energii však môže stratiť aj mechanický systém generujúci pohyb vzduchu v tesnej blízkosti systému, ak existujú tlmiace mechanizmy, ktoré ovplyvňujú pohyb vzduchu [3].

Pocit sluchu pre človeka sa pohybuje od približne 20 Hz do približne 20 kHz, aj keď citlivosť pri frekvenciách pod približne 100 Hz alebo nad 10 kHz podstatne klesá. Táto frekvenčná charakteristika je pochopiteľne dobre prispôbená ľudskej reči, ktorej väčšina energie leží medzi 100 Hz a 10 kHz [4].

## 1.2 HLUK

Výraz „hluk“ v hovorovom jazyku znamená hlasný, nepríjemný, nežiaduci alebo rušivý zvuk. V akustike je použitie tohto výrazu obmedzenejšie. Zatiaľ čo mnohí používajú tento výraz na opis zvuku pozdĺž diaľnice, letiska alebo od suseda, použitie tohto slova by sa malo skutočne obmedziť na signály (napríklad zvuk a napätie), ktoré nemajú význam [3]. Mnoho generátorov zvuku produkuje skôr šum ako čisté tóny. Zatiaľ čo čisté tóny a ďalšie periodické signály sú deterministické, šum je stochastický alebo náhodný jav. Stacionárny šum je stochastický signál so štatistickými vlastnosťami, ktoré sa časom nemenia [5].

### 1.3 AKUSTICKÉ VELIČINY

#### AKUSTICKÝ TLAK

Osoba, ktorá nie je hluchá, vníma ako zvuk akékoľvek vibrácie bubienka v počuteľnom frekvenčnom rozsahu, ktoré sú výsledkom postupnej zmeny tlaku vzduchu v uchu. Hovorí sa o zmene tlaku nad a pod atmosferickým tlakom akustický tlak, v jednotkách pascalov (Pa). Jeden pascal (Pa) = 1 newton/meter štvorcový (N/m<sup>2</sup>) = 10 dynov/cm<sup>2</sup> [6].

Pretože sluchový mechanizmus reaguje na zvukový tlak, je jedným z dvoch veličiny, ktoré sa zvyčajne merajú v technickej akustike. Normálne ucho je najcitlivejší na frekvenciách 3000 až 6000 Hz a mladý človek môže detegovať tlaky len asi 20 μPa, čo je v porovnaní s normálom atmosférický tlak (101,3 × 10<sup>3</sup> Pa), okolo ktorého sa mení, je zlomkový variácia  $2 \times 10^{-10}$  [6].

**Tab. 1** Vplyv decibelov na ľudský sluch [7].

Akustický tlak L <sub>p</sub> (dBa)	Hluk	Subjektívne hlasitosť
0	-	Prah počuteľnosti
20	Tikot hodínok	Extrémne slabé zvuky
40	Hučanie chladničky	Veľmi slabé zvuky
60	Bežná konverzácia	Stredne hlasné zvuky
80	Jazda autom	Veľmi hlasné zvuky
100	Symfonický orchester	Extrémne silné zvuky
120	Štartujúce lietadlo	Prah bolestivosti

#### ČISTÝ TÓN

Čistý tón je zvuková vlna, ktorú je možné vyjadriť rovnicou [6]

$$p(t) = p_0 \sin(2\pi f) t, \quad (1)$$

kde  $p(t)$  je okamžitý, prírastkový, zvukový tlak (nad a pod atmosferickým tlakom),  $p_0$  je maximálna amplitúda okamžitého zvukového tlaku a  $f$  je frekvencia, to znamená počet cyklov za sekundu, vyjadrený v hertz. Čas  $t$  je v sekundách [6].

## INTENZITA ZVUKU

Ďalšou veličinou, ktorá sa bežne meria v technickej akustike, je intenzita zvuku, definovaná ako nepretržitý tok energie prenášaný zvukovou vlnou cez prírastkovo malú oblasť v bode v priestore. Jednotky sú watty na meter štvorcový ( $\text{W/m}^2$ ). Toto množstvo je dôležité z dvoch dôvodov. Po prvé, v bode voľného priestoru, súvisí s celkovým výkonom vyžarovaním do vzduchu zdrojom zvuku, a po druhé, v tomto bode má pevný vzťah k akustickému tlaku. Intenzita zvuku v bode je smerová (vektor) v tom zmysle, že poloha roviny prírastkovo malej oblasti sa môže meniť od kolmej na smer, v ktorom sa vlna pohybuje, po rovnobežnosť s týmto smerom. Má svoju maximálnu hodnotu  $I_{max}$ , keď je jej rovina kolmá na smer jazdy. Pri rovnobežnosti je intenzita zvuku nulová. Medzi tým sa zložka  $I_{max}$  mení ako kosínus uhla tvoreného smerom pohybu a priamky kolmej na prírastkovú oblasť. V prostredí, kde neexistujú odrazujúce povrchy, súvisí akustický tlak v ktoromkoľvek bode ľubovoľného typu voľne sa pohybujúcej vlny (rovinnej, valcovej, sférickej atď.) s maximálnou intenzitou  $I_{max}$  o [6]

$$p_{rms} = I_{max} \cdot \rho c, \quad (2)$$

kde  $p_{rms}$  je rms akustický tlak v Pascaloch ( $\text{N/m}^2$ ),  $\rho$  je hustota vzduchu v  $\text{kg/m}^3$ ,  $c$  je rýchlosť zvuku vo vzduchu v  $\text{m/s}$  a  $N$  je sila v Newtonoch [6].

## 1.4 HLADINA AKUSTICKÝCH VELIČÍN

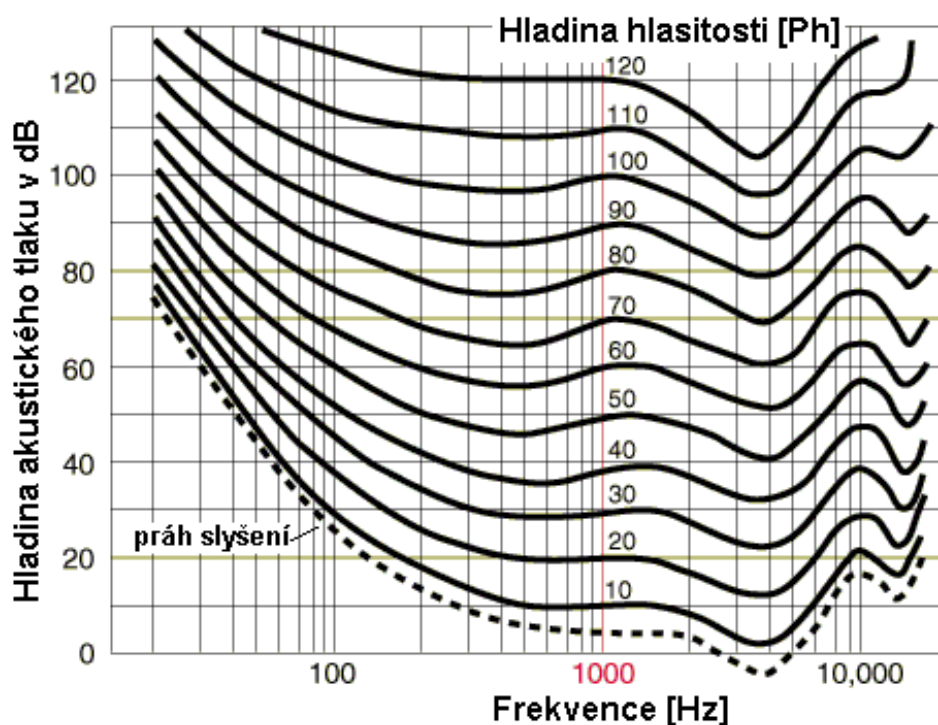
Akustický tlak a výkon sa bežne vyjadrujú v decibelových úrovniach. To nám umožňuje používať skôr logaritmickú ako lineárnu stupnicu. Poskytuje výraznú výhodu spočívajúcu v umožnení presných výpočtov pomocou malých číselných hodnôt a pri prispôbovaní širokého rozsahu číselných hodnôt [8].

### HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU

Hladiny akustického tlaku sú vyjadrené v decibeloch, rovnako ako hladiny akustického výkonu. Hladina akustického tlaku,  $L_p$ , je definované ako [8]

$$L_p = 10 \log \left( \frac{\bar{p}^2}{p_{re}^2} \right) = 20 \log \left( \frac{\bar{p}}{p_{re}} \right), \quad (3)$$

kde  $\bar{p}$  označuje príslušný stredný kvadrát (RMS) príslušný tlak Pa alebo  $\text{N/m}^2$  a  $p_{re} = 20 \times 10^{-6} \text{ Pa} = 0.0002 \text{ } \mu\text{bar}$ . Ako referencia bol zvolený tlak  $20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ , pretože sa zistilo, že priemerný mladý dospelý človek dokáže pri tomto tlaku vnímať tón  $10^3 \text{ Hz}$ . Tento odkaz sa často nazýva prahová hodnota sluchu pri  $10^3 \text{ Hz}$  [8].



Obr. 1 Barkhausenove krivky rovnakej hlasitosti [1].

### HLADINA AKUSTICKÉHO INTENZITY

Rovnako ako akustický výkon, aj akustickú intenzitu je možné vyjadriť pomocou úrovne akustickej intenzity vydelením referenčnou hodnotou a vykonaním logaritmov hodnotou a vykonaním logaritmov. Úroveň intenzity zvuku,  $L_I$ , je definované jako [9]

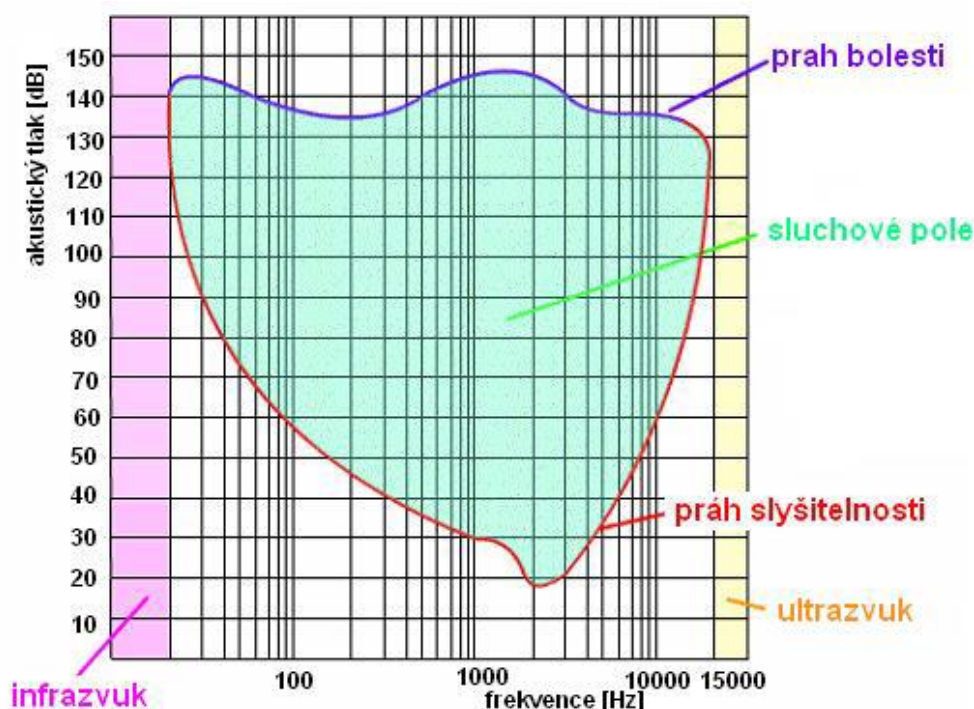
$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}, \quad (4)$$

kde  $I_0$  je medzinárodne akceptovaná hodnota. To je [9]

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2} = 1 \text{ pW m}^{-2}. \quad (5)$$

## 1.5 ÚČINKY HLUKU NA ČLOVEKA

Nadmerné vystavenie hluku spôsobuje trvalé poškodenie sluchu zničením buniek sluchového senzora [8].



Obr. 2 Hranica počuteľnosti zvuku človeka [1].

Hluk má významný vplyv na psychiku jednotlivca a mnohých prípadoch spôsobuje únavu, depresiu, agresivitu, nechúť, nevoľu, zhoršenie pamäti, stratu pozornosti a celkové zníženie výkonu [10].

## 1.6 ZDROJE HLUKU OSOBNÝCH VOZIDIEL

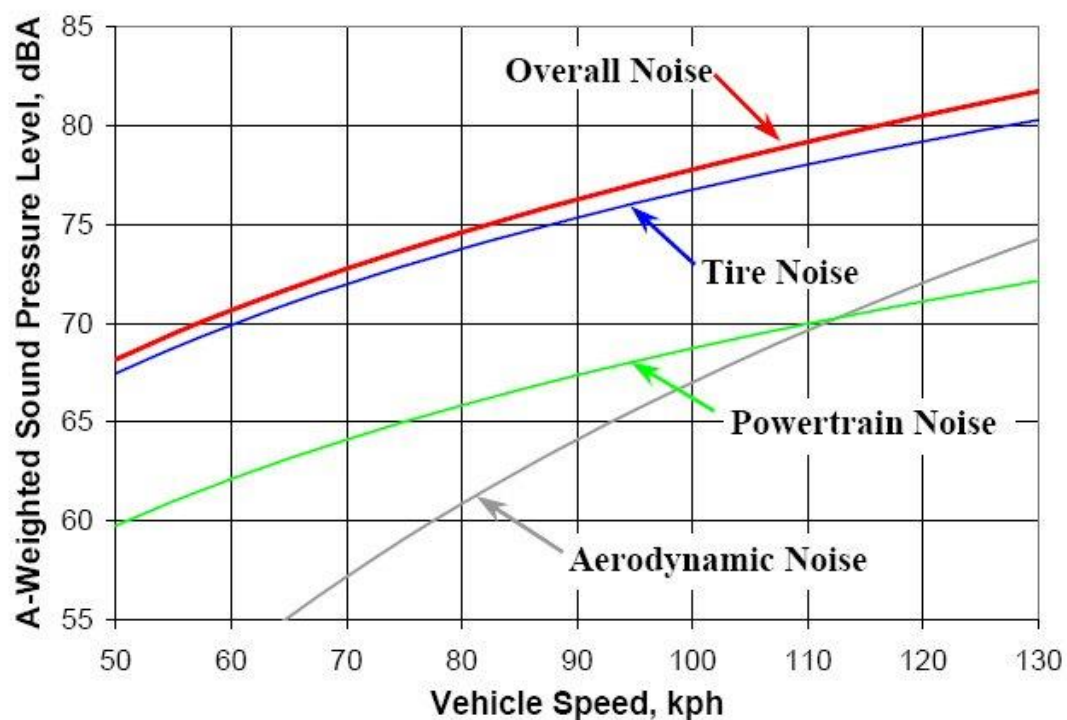
Medzi zdroje hluku vozidla zahŕňajú hnaciu sústavu vozidla, prúdenie vzduchu okolo vozidla, pneumatiky, brzdy a samotnú karosériu. Samotná pneumatika však nespôsobuje hluk, musí byť v kontakte s povrchom vozovky.

Hluk vozidla možno rozdeliť do troch skupín:

- hluk motoru,
- aerodynamický hluk - spôsobený samotnou karosériou vozidla, keď sa pri jazde rozbije vzduch,
- hluk vznikajúci kontaktom pneumatik s vozovkou.

S výnimkou zle udržiavaných vozidiel, niektorých motocyklov a nákladných vozidiel využívajúcich kompresné brzdy motora, je pri rýchlostiach medzi 50 km/h a 145 km/h dominantným zdrojom dopravného hluku hluk interakcie pneumatík a vozovky. Typické rozdelenie hluku s rýchlosťou z automobilov je znázornené na obr. 3. Hluk nákladných vozidiel je podobný, až na to, že hluk motora je dôležitý na približne 65 km/h. Najvyššou prioritou pri znižovaní hluku z premávky je teda zníženie hluku pri interakcii pneumatika s

vozovkou [11]. Pri rýchlostiach vyšších ako 200 km/h je dominantnou zložkou aerodynamický hluk [12].



**Obr. 3** Hluk osobného automobilu v závislosti na rýchlosti [11].

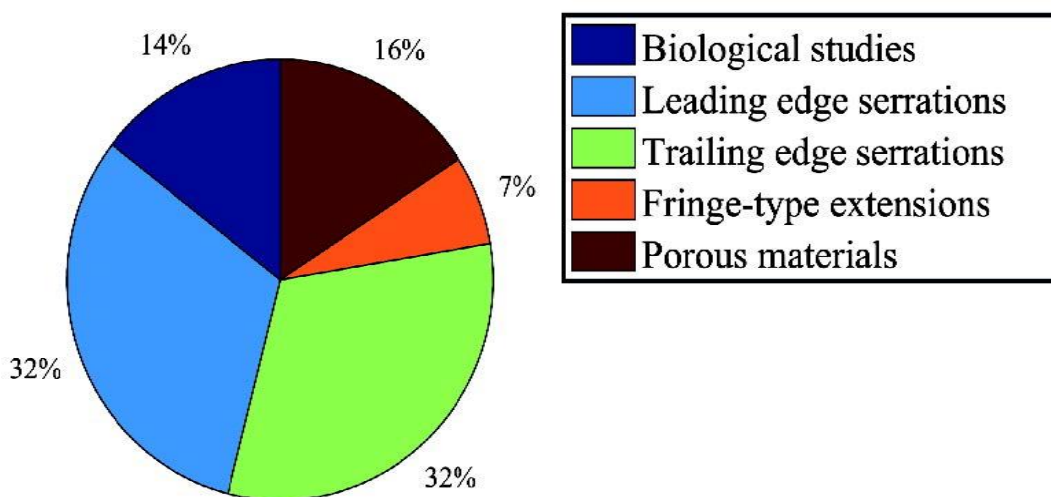


## 2 BIONIKA

Bionika skúma štruktúru, funkciu a pracovné princípy biologických systémov a pokúša sa transplantovať tieto koncepty, ktoré sa v prírode nachádzajú, aby vytvorila nové inžinierske technológie a aby vymyslela vynikajúce prístroje, zariadenia a stroje, ktoré pomôžu pri riešení zložitých ľudských problémov [13].

Súčasná pozorovania a štúdie na väčšine rodov sov zistili, že môžu lietať ticho blízko svojej koristi a majú známu schopnosť tichého letu, čo môže byť vynikajúcim biologickým vodítkom pre nálezové riešenia aerodynamických štruktúr [13].

V minulosti bolo vykonaných niekoľko teoretických, numerických a experimentálnych štúdií s cieľom preskúmať uskutočniteľnosť, vplyv parametrov, aerodynamické účinky a základné mechanizmy techník redukcie šumu inšpirovaných zúbkovaným, okrajovým a poréznym materiálom [13].



**Obr. 4** Prehľad štúdií o biologicky inšpirovanom aerodynamickom tlmení hluku podľa kategórií [13].

### 2.1 KRÍDLA SOV

Mnoho druhov sov má schopnosť ticho lietať. Tichá sova v kľzavom aj mávajúcom lete vytvára hluk pri nízkych frekvenciách pod 2 kHz, čo je pod úrovňou sluchu svojej koristi (2 kHz až 20 kHz) [14].



**Obr. 5** Obrázky pierok sovy, a) nábežná hrana; b) zadná hrana; c) povrch krídla [14].

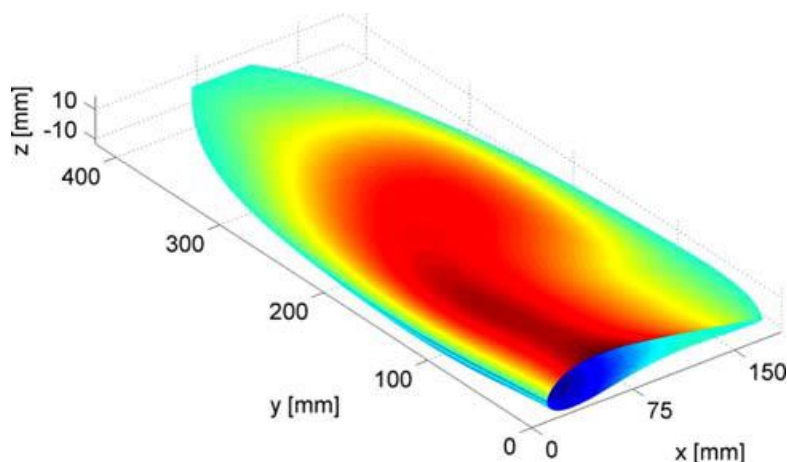
Graham [15] v roku 1934 uviedol tri charakteristické a jedinečné vlastnosti krídla sovy, ktoré boli zodpovedné za tichý let: (1) zúbkovanie prednej hrany - má sfarbenie v tvare hrebeňa [16] obr. 5(a); (2) mäkké strapce na zadnom okraji hlavných krídel a niektorých primárnych pierok obr. 5(b); a (3) nadýchaný horný pierkový povrch a zamatový spodný povrch na krídlach sov a tiež hrubo na nohách obr. 5(c) [13].

Niektorí vedci sa navyše domnievali, že k tichému letu sovy okrem troch osobitných charakteristík prispievajú aj ďalšie faktory. Ren a kol. verili, že potlačenie hluku sovy ušatej (*Asio otus*) je výsledkom synergického efektu materiálu, štruktúry kože a tvaru peria atď., a nazval túto synergiu ako biologické spojenie. Usúdili, že pružnosť pokožky a jej štruktúra môžu tiež hrať dôležitú úlohu pri tichom lete [14].

## 2.2 NÁBEŽNÁ HRANA

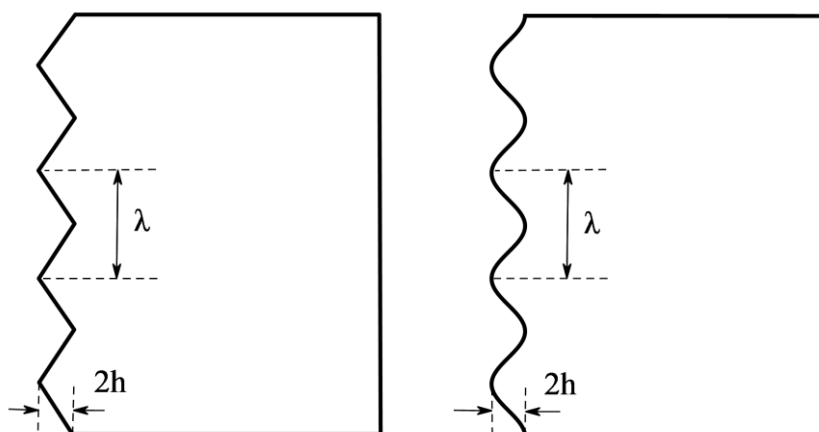
Niektoré aerodynamické výskumy na nábežnej hrane s ozubením a bez neho naznačili, že zúbkovanie nábežnej hrany prispieva k stabilizácii letu a môže zabrániť laminárnemu oddeleniu toku na povrchu krídla. Ukazuje sa, že zúbkovanie nábežnej hrany sa chová ako skupina tesne prúdiacich generátorov vírov, ktoré môžu znižovať oddeľovanie prúdenia a hrúbku medznej vrstvy a podľa toho stabilizovať prúdenie vzduchu na povrchu krídla. Je teda potlačené vytváranie veľkého vírivého šumu [14].

Klän a kol. študovali vplyv špičkových zúbkov na prietokové pole modelu 3D profilu krídla (obr. 6), ktorý bol odvodený z krídel sovy obyčajnej, pomocou pokročilého meracieho zariadenia. Na zostrojenie umelého krídla pre testy v aerodynamickom tuneli sa použili trojrozmerné povrchové skenovania. Štúdie zistili, že vplyv zubov okrajového poľa na tokové pole je vysoko závislé od podmienok prúdenia, ako je uhol nábehu a Reynoldsovo číslo, a poloha rozpätia tiež ovplyvnila účinnosť zubov. Okrem toho bol demonštrovaný vplyv zamatového povrchu, čo sa prejavilo aj v priestorových dvojbodových vzťahoch zložky normálnej rýchlosti. Vo všetkých testovacích prípadoch bola veľkosť a vzdialenosť vírov zmenšená zamatovým povrchom [16].



**Obr. 6** Trojrozmerná geometria finálneho modelu krídla [16].

Biologicky inšpirovaná simulácia nábežnej hrany sovy sa dá všeobecne rozdeliť na pílkovité a sínusové zúbky (obr. 7), ktoré sa osvedčili ako účinné techniky pasívneho riadenia toku na zníženie hluku [13].



**Obr. 7** Schéma zúbkovania nábežnej hrany ukazujúce parametre vlnovej dĺžky  $\lambda$  a amplitúdy  $h$ : a) pílkovité zúbkovania; a b) sínusové ozubenenia [13].

Na základe experimentov Hersha a Haydena [17] sa kolísavý zdvih (zdroj dipólu akustického tónu), odporu a výšky momentu účinne znížil pripojením pílkovitých zubov. Naopak, neboli pozorované žiadne významné zlepšenia alebo nepriaznivé účinky na stabilný alebo priemerný aerodynamický výkon. Pri vysokých uhloch nábehu zodpovedajúcich zastaveniu zúbkovanie tiež znížilo širokopásmový šum. Uhol vzletu, ani zastavenia sa merateľne nezvýšil pomocou zúbkovania pre žiadny profil krídla.

Hansen a kol. [18] zistili, že sinusové ozubenie na prednej hrane významne znížilo tonálny šum. Začlenenie výbežkov do nábežnej hrany profilu krídla uľahčuje zníženie a potenciálne odstránenie tonálneho hluku pre profil krídla NACA 0021 (obr. 8). Širokopásmový šum je navyše výrazne znížený pre rozsah frekvencií susediacich s tonálnym vrcholom. Predpokladá sa, že zodpovedný mechanizmus zahŕňa generovanie prúdových vírov, ako aj variácie rozpätia v rozmedzí oddeľovacieho miesta. Oba efekty menia charakteristiky stability medznej vrstvy, ovplyvňujú koherenciu vírov po smere od zadnej hrany, a tým znižujú tvorbu šumu na zadnej hrane. Tiež uzavretie separačných bublín do žľabov medzi výbežkami znižuje vnímavosť medznej vrstvy na vonkajšie akustické vzrušenie. V dôsledku toho je minimalizovaný potenciál pre vývoj spätnoväzobnej slučky, čo je ďalším vysvetlením významného zníženia alebo absencie tonálneho šumu pre profilové profily s výbežkami.

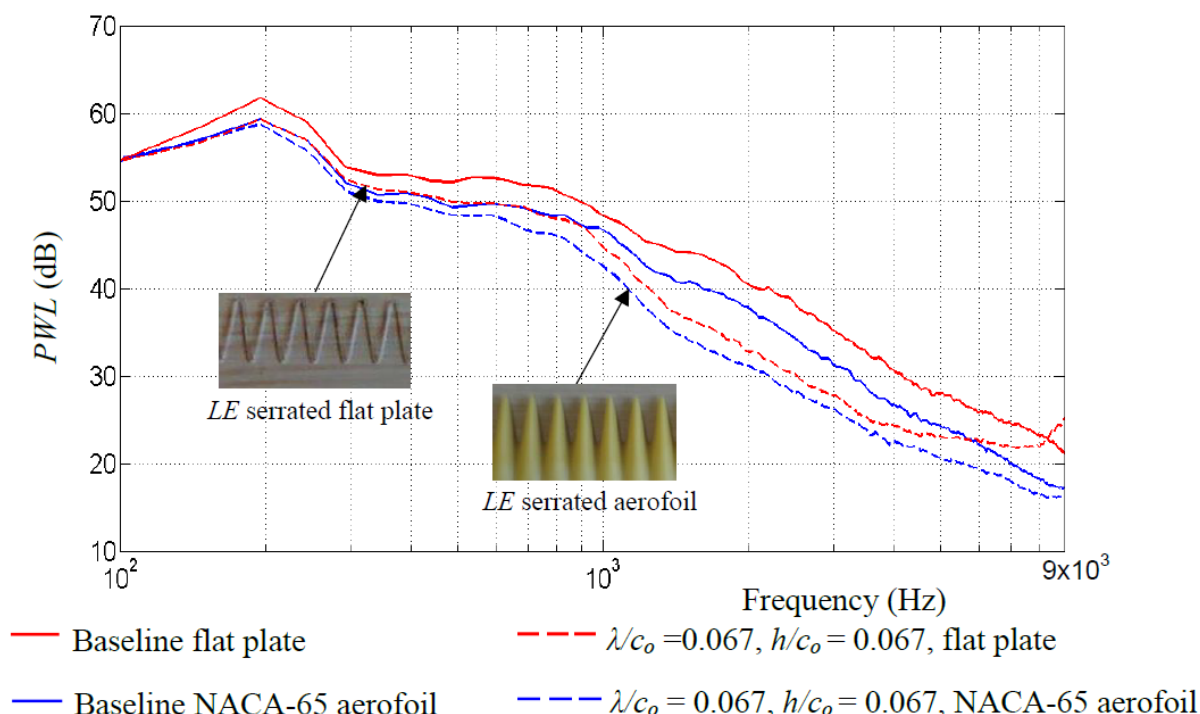


**Obr. 8** 3D pohľad na profil krídla s výbežkami [18].

V práci Ita [19] boli zúbky na prednej hrane sovích krídel pre experimenty imitované listami priamočiarej píly pripevnenými k profilu krídla a boli merané aerodynamické vlastnosti profilu krídla. Tokové pole okolo profilu krídla bolo vizualizované v dymovom tuneli. Aerodynamické vlastnosti majú silný efekt Reynoldsovho čísla a účinnosť zúbkovania sa javí najmä v nízkom Reynoldsovom čísle. Okrem toho sa charakteristiky zdvihu zlepšujú pomocou jemných zúbkov pri nízkom Reynoldsovom čísle a oddeľovanie toku na sacej strane je riadené jemnými zúbkami v uhle nábehu, kde sa tok oddeľuje od zúbkovania 0.

V práci Narayanana a kol. [20] výkon redukcie šumu plochých dosiek so sínusovým zúbkovaním nábežnej hrany rôznych vlnových dĺžok a amplitúd bol experimentálne skúmaný ich umiestnením v turbulentnom prúde a meraním ich šumu vo vzdialenom poli. Zistilo sa, že ich akustické vlastnosti sú podobné tým, ktoré sa dosahujú na realistických profiloch s rovnakou geometriou nábežnej hrany. Akustické vlastnosti zúbkovaných plochých dosiek sa porovnávajú s bezzúbkovanými z hľadiska úrovni zníženia akustického výkonu ( $\Delta$ PWL). Porovnanie spektier vyžarovaného zvukového výkonu s a bez zúbkovania nábežnej hrany ukázalo, že nad určitú kritickú frekvenciu je možné dosiahnuť významné zníženie hluku v nábehu. Táto dolná hraničná frekvencia zodpovedá situácii, v ktorej sa najmenej 0,5 hydrodynamickej vlnovej dĺžky zmestí do zúbkovej amplitúdy. To znamená, že mechanizmus potlačenia hluku je v zásade spôsobený interferenciou zvuku vyžarovaného pozdĺž okrajov. Vyšetrovanie tiež preukázalo, že amplitúda zúbkovania je faktorom, ktorý určuje hlavne výkon regulácie hluku. Je preukázané, že celková hladina zníženia hluku v decibeloch sa

logaritmicke mení s dĺžkou zúbkovania. Znamená to, že zlepšenia výkonu regulácie hluku sa postupne zvyšujú so zvyšovaním dĺžky zúbkovania.



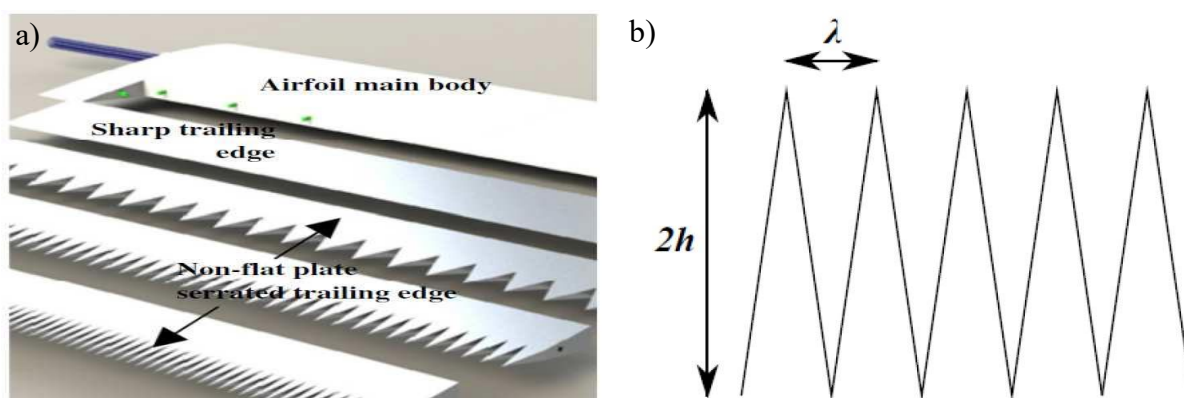
**Obr. 9** Porovnanie spektier hladín akustického výkonu medzi základnou plochou doskou a zúbkovanou plochou doskou ( $\lambda/c_o = 0,067, h/c_o = 0,067$ ) s východiskovým profilom NACA-65 a zúbkovaným profilom NACA-65 ( $\lambda/c_o = 0,067, h/c_o = 0,067$ ) pri  $U = 40$  m/s [20].

Štúdie Geyera a kol. [21] popisuje súbor experimentov, ktoré sa uskutočňovali na dvoch pripravených krídlach sovy obyčajnej s cieľom preskúmať funkciu hrebeňa na prednej hrane krídel sovy. Zahŕňalo to merania aerodynamických síl, akustické merania pomocou technológie mikrofónového poľa a základné merania deformácie krídla. Toto vyšetrenie vo všeobecnosti prináša tri hlavné výsledky: Po prvé, hrebeň na prednej hrane vedie k malému zvýšeniu zdvíhu. Po druhé, súčasné výsledky naznačujú, že hrebeň skutočne vedie k malému zníženiu kĺzavého hluku letu pri vysokých uhloch nábehu. Zdá sa, že toto zníženie hluku je spôsobené skutočnosťou, že hrebeň nábežnej hrany zjavne bráni rozvoju silného zdroja hluku na konci krídla, ku ktorému došlo iba v prípade, keď bol hrebeň odstránený. Po tretie, merania ukázali, že deformácia krídla je o niečo menšia, keď je hrebeň prednej hrany neporušený. To naznačuje, že prítomnosť hrebeňa na prednej hrane umožňuje stabilnejší let.



## 2.3 ZADNÁ HRANA

Strapce na zadnej hrane krídel sovy znižujú alebo dokonca eliminujú rozptyl šumu na zadnej hrane pri rýchlosti letu sovy. Zuby môžu byť tiež použité na zadnej hrane profilových profilov alebo lopatiek na zníženie širokopásmového vlastného šumu a nestability tonálneho šumu. Všeobecne možno použitie zúbkovania zadnej hrany rozdeliť na dva rôzne typy: pridanie tenkých zúbkovaných plochých dosťičiek k existujúcej zadnej hrane a rezanie tvarov zubov priamo z ostrej zadnej hrany (obr. 10a). Podobne ako pri zúbkovaní prednou hranou, hlavnými geometrickými parametrami spojenými so zúbkovaním za zadnou hranou sú vlnová dĺžka zúbkovania a amplitúda zúbkovania (obr. 10b) [13].



**Obr. 10** Zúbkovanie zadných hrán: a) CAD výkres profilu krídla s jednou ostrou zadnou hranou a tromi zúbkovanými zadnými hranami s plochými doskami; a (b) náčrt zúbkovania zadnej hrany s definíciou vlnovej dĺžky  $\lambda$  a amplitúdy  $h$  [13].

Howe [22] vyvinul prvý teoretický model pre účinok znižovania hluku zúbkovaných zadných hrán v roku 1991. Navrhol, aby bolo možné výrazné zníženie šumu na zadnej hrane, keď je hrana zúbkovaná. Útlm možno pripísať účinnému zníženiu dĺžky zadnej časti krídla profilu krídla v rozpätí, ktoré skutočne prispieva k vytváraniu zvuku. Pri vysokých frekvenciách vírivá turbulentná hraničná vrstva konvekčná cez okraj, charakterizovaná vlnovým číslom vektora  $K \equiv (K1, 0, K3)$  v rovine profilu krídla, generuje okrajový šum iba v susedstvách tých oblastí, kde  $K$  je normálna na okraj. Optimálne útlmy by sa mali v zásade dosiahnuť použitím zúbkovania profilu pílky s hranami sklonenými pod stredným prietokom pod uhlom  $45^\circ$ . Pre zúbkovanú hranu sínusového profilu závisí útlm pri vysokých frekvenciách iba od pomeru amplitúdy  $h$  zúbkov k ich vlnovej dĺžke  $\lambda$  v rozpätí. Pri  $\lambda/h \geq 10$  je útlm menší ako asi 1 dB. Keď  $\lambda/h = 1$ , predpovedaný útlm je asi 8 dB. Analýza bola vykonaná iba na hranici nekonečne malého stredného prietoku Machovho čísla, a výsledky sú preto obzvlášť dôležité pre podvodné aplikácie.

Gruber a kol. [23] podľa Howeových myšlienok o predpovedi žiarenia šumu vzdialeného poľa od zúbkovanej zadnej hrany odvodí podobný výraz pre rozptýlený tlak aj pre štrbinové zúbkovanie. Predpovede zúbkovania zubov a štrbín ukazujú potenciálne zníženie hluku okolo 30 až 35 dB pri vysokých frekvenciách. V praxi experimentálne údaje ukazujú, že pílkovité zúbkovanie efektívne redukuje hluk asi o 5 dB v nízkych a stredných frekvenčných rozsahoch, zatiaľ čo štrbinové zúbkovanie redukuje hluk asi o 3 pri nízkych frekvenciách, ale zvyšuje šum od asi 700 Hz. Pre všetky geometrie sa zistilo bežné zvýšenie

vysokofrekvenčného šumu. Kritické frekvencie  $f_0$ , nad ktorými sa zvyšuje hluk, sa menia s priemernou rýchlosťou prúdenia a sledujú vzťah založený na Strouhalových číslach  $St_0 = f_0 \delta / (U - U_0)$  a  $St_0 \approx 1,18$ , kde  $U_0$  je hodnota  $U$ , keď  $U \rightarrow U_0$ . Ukázalo sa, že nárast šumu pre štrbinové zúbkovanie pri stredných frekvenciách sleduje rovnaké vzťahy pre rôzne hodnoty Strouhalových čísel. Okrem toho môže byť každá frekvenčná oblasť zvyšovania šumu dobre obmedzená jednou kritickou frekvenciou, pre ktorú je Strouhalovo číslo konštantné.

Podľa štúdie Chonga a kol. [24], dynamika toku v medzerách pílových zubov, vystavená širokému rozsahu odporu prúdenia (vrátane nulového odporu prietoku ako zúbkovaného puzdra plochej dosky), môže ovplyvniť hlukovú charakteristiku krídla nasledujúcimi spôsobmi:

- Pre veľmi nízky odpor prietoku v medzere píly, je efekt zúbkovania zosilnený šikmým priečnym prúdením v smere od koreňa píly po koniec. Je možné dosiahnuť podstatné zníženie širokopásmového šumu, pravdepodobne v dôsledku slabšieho rozptylu šumu na týchto miestach. Pozdĺžny priečny tok (vylučovanie vírov) je výrazný v medzere píly, čo vedie k vyžarovaniu veľkého tónu šumu.
- Pre veľmi vysoký odpor prietoku v medzere píly sa zníži efekt zúbkovania (teraz viac ako rovná zadná hrana), čo vedie k zníženej účinnosti pri znižovaní širokopásmového šumu. Priečny tok v medzere píly môže byť úplne potlačený, čo nakoniec vedie k veľkému zníženiu tonálneho šumu.
- Pre optimálny odpor prúdenia v medzere píly sa efekt zúbkovania zachová, ak nie je mierne zvýšený, kde je možné dosiahnuť ďalších 1,5 dB v  $\Delta SPL$ . V tomto prípade sa môže vyskytnúť viacnásobný širokopásmový mechanizmus redukcie šumu (zúbkovanie + porézny materiál), ale je dosť pravdepodobné, že dynamika toku v poréznom materiáli zvyšuje zúbkovanie skôr ako porézny materiál vyvíjajúci efekt „pórovitosti“ ako taký. Priečny tok v medzere píly môže byť stále úplne potlačený. Žiadne vyžarovanie tonálneho hluku.

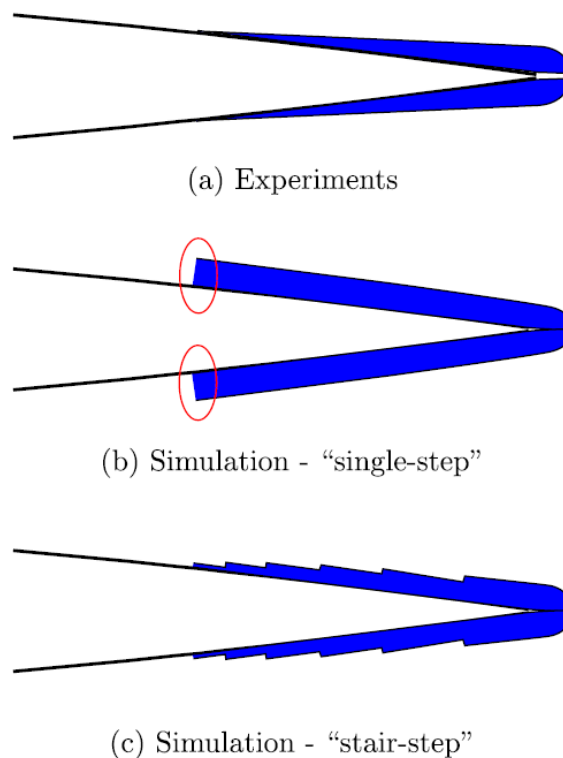
Napokon analýza rýchlosti prebudenia pre stredné a kolísavé zložky naznačuje, že je nepravdepodobné, že by sa celková sila odporu zvýšila, keď sa použije zadná hrana s pórovitým ozubením [24].

Práca Boldinga a Sharmy [25] predstavuje numerické skúmanie geometrií profilov krídel inšpirovaných spodným plášťom sovy. Účinok vrchného a spodného plášťa sa dosiahne použitím finetových plotov navrhnutých Clarkom a kol. [26]. Veľké vírivé simulácie sa vykonávajú pre základný profil (NACA 0012) profilu krídla a dva profily krídla s finetovými plotmi. Kvalitatívne porovnania boli urobené pomocou experimentov s plotmi na overenie trendovej predikčnej schopnosti prístupu. Zo štúdie vychádzajú tieto závery:

- Porovnania spektier povrchového tlaku ukazujú zníženie pri vysokých frekvenciách a mierne zvýšenie nízkych frekvencií v blízkosti zadnej hrany profilu krídla s plotmi.
- Porovnania spektra šumu na vzdialenom poli ukazujú redukcie až o 10 dB pri frekvenciách od 500 do 5 000 Hz pre simuláciu schodišťového plotu (obr. 11c); pri simulácii jednokrovového oplatenia (obr. 11b) neboli pozorované žiadne redukcie.

- Obrysové grafy a priemery rozpätia kinetickej energie normalizovanej turbulencie (TKE) ukazujú jasné prerozdelenie TKE od zadnej hrany profilu krídla.

Výsledky ukazujú, že jedným z dôvodov pozorovaného zníženia hluku pri plotoch je zväčšená vzdialenosť oddeľovania okrajov od zdroja, ktorá spôsobila, že proces rozptylu okrajov bol menej efektívny. Ďalším mechanizmom znižovania šumu na vzdialenom poli pri nízkych frekvenciách je identifikácia zníženia koherencie rozsahu. Nedostatočné zníženie hluku na diaľku z jednokrového plotu demonštruje dôležitosť toho, aby bola nábežná hrana plotu takmer vyrovnaná s prichádzajúcim tokom [25].



**Obr. 11** Schémy zvyrazňujúce rozdiely v geometriách oplatenia medzi experimentmi a simuláciami [25].



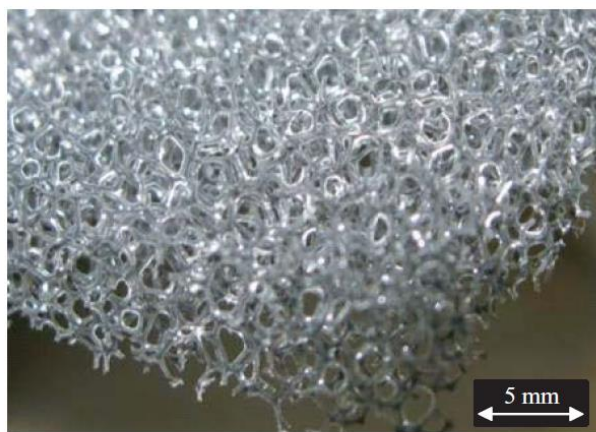
## 2.4 REDUKCIA ŠUMU INŠPIROVANÁ PÓROVITÝM MATERIÁLOM

Chrbtové pierko sovy, má páperový a zamatový povrch. Porózna štruktúra sa ukázala ako dobrý materiál na absorpciu zvuku pre vysokofrekvenčnú absorpciu zvuku, takže predpokladáme, že zamatovo podobný povrch peria má funkciu potlačenia vysokofrekvenčného šumu [14].

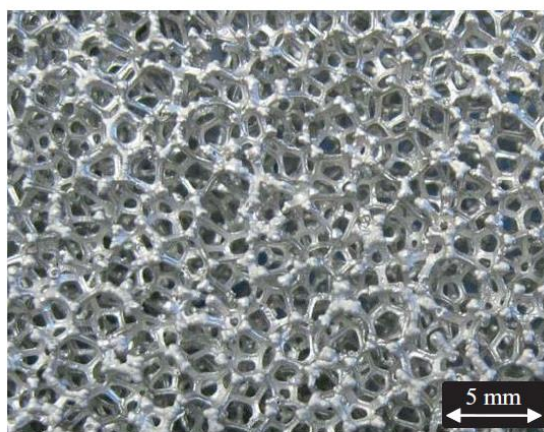
Aeroakustické účinky mäkkého a elastického páperového horného povrchu krídel a nôh sovy sú ekvivalentné zvýšenej priepustnosti pre vzduch, takže ďalšou bio-inšpirovanou technikou kontroly aerodynamického hluku je skúmanie účinkov použitia rôznych pórovitých materiálov, ktoré sú otvorené a vzájomne sa ovplyvňujú prepojené póry pre stavbu objektov a následné zníženie emisie hluku [13].

V štúdií Sueki a kol. [27] na valce a vysokorýchlostný pantograf boli použité pórovité materiály na zníženie aerodynamického hluku a boli skúmané účinky týchto opatrení pri skúškach v aerodynamickom tuneli. Dosiahli tieto hlavné závery:

- Aplikácia pórovitého materiálu je veľmi účinná pri znižovaní aerodynamického hluku vyžarovaného z valcov.
- Pórovitý uretán (obr. 12a) a pórovitý kov (obr. 12b) majú rovnakú úroveň účinku zníženia aerodynamického hluku.
- V podmienkach tohto výskumu majú porézne materiály, ktoré obsahujú približne trinásť článkov na 25,4 mm (jeden palec), najväčší účinok na zníženie aerodynamického hluku.
- Aplikácia pórovitého kovu je účinná pri znižovaní aerodynamického hluku spôsobeného vysokorýchlostnými zberačmi.



(a) Porous urethane



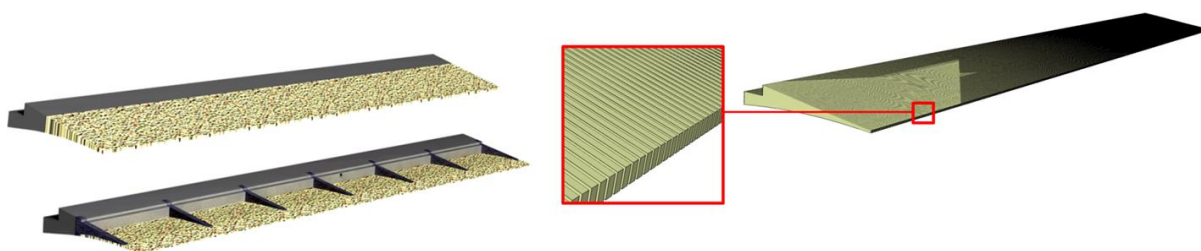
(b) Porous metal

**Obr. 12** Zväčšené pohľady na dva rôzne pórovité materiály otvoreného typu vyrobené z (a) uretánu a (b) kovu [27].

Usúdilo sa, že použitie pórovitých materiálov je široko použiteľné v priemysle a že táto technika je vhodná na použitie v rôznych oblastiach vrátane vysokorýchlostných železníc [27].

Štúdia Jaworského a Peakeho [28] však ukázala, že aerodynamický hluk spôsobený turbulentnými vírmi blízko pórovitej a poddajnej hrany je modelovaný ako problém akustického rozptylu zahŕňajúci polo nekonečnú poroelastickú dosku. Technika Wiener-Hopf rieši tento problém presne v rozsahu pórovitosti, vnútorného zaťaženia tekutinami a frekvenčných parametrov a základné multiplikatívne štiepenie jadra sa vykonáva numericky všeobecne a asymptoticky pre špeciálne prípady pórovitých a nepriepustných elastických hrán. Ukázalo sa, že kombinované účinky pružnosti a pórovitosti vedú k najslabšiemu zosilneniu okrajov, ale k žiadnej výraznej zmene exponenta rýchlosti v sledovanom frekvenčnom rozsahu. Zohľadnenie rozsahu ľudského sluchu naznačuje, že pre poroelastickú hranu sú pri nízkych frekvenciách prístupné rýchlostné exponenty šesť alebo väčšie a že vlastnosti hrany môžu byť prispôsobené tak, aby poskytovali zvýšenú redukciu šumu v širšom frekvenčnom rozsahu ľudského auditu. Pre tichý let sov model vyžaduje, aby akustická vlnová dĺžka najmenej sledovanej frekvencie (1,6 kHz) bola dostatočne veľká, takže akord krídla nemožno považovať za akusticky kompaktný. Poznamenávame, že nastáva podstatný skok v dĺžke akordu, ktorý sa stáva porovnateľným s touto kritickou vlnovou dĺžkou.

Herr a kol. [29] opäť potvrdili to, čo sa už uvádzalo v predošlých štúdiách. Porézne alebo štrbinové úpravy koncových hrán (obr. 13) použité ako náhrada zadnej časti profilu krídla môžu dosiahnuť maximálne zníženie širokopásmového šumu rádovo 2-6 dB. Spektrá šumu odtokovej hrany pre porézne odtokové hrany boli tiež potvrdené tak, aby sledovali typické (rýchlosť) 5 zvýšenie intenzity zvuku, ako je všeobecne pozorované v pevnom referenčnom prípade.

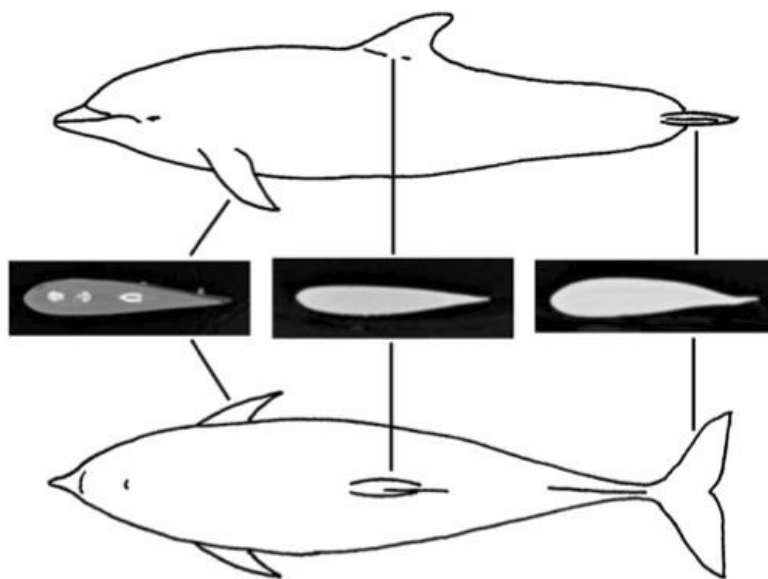


**Obr. 13** Herrova realizácia pórovitej oblasti ako pevnej pórovitej časti (vľavo hore) alebo ako plankovaná, dutá vložka (vľavo dole s neviditeľnou hornou časťou kože). Vložka so zadnou hranou so zárezmi (vpravo) [29].

## 2.5 KOŽA DELFÍNOV A ŽRALOKOV

Zníženie aerodynamického odporu sa ukázalo ako sľubná stratégia na zvýšenie palivovej účinnosti cestných vozidiel, pretože tento prístup do značnej miery znižuje spotrebu paliva u stredne veľkých a ťažkých vozidiel [30].

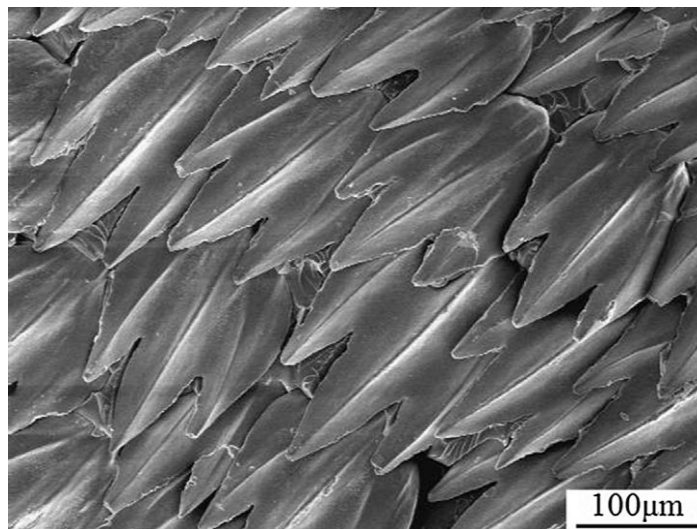
Štúdium delfínov a žralokov je obzvlášť zaujímavý, pretože prešli miliónmi rokov prirodzeného výberu a podľa Darwinovho argumentu sú preto korisťou „vhodnou“ na prežitie vo vodnom prostredí. U delfínov poskytuje efektívny tvar „slzy“ (obr. 14) najväčšiu redukciu odporu a ďalšie vnímané „mechanizmy zázrakov“, ako sú kožné záhyby, neprispievajú k zníženiu odporu. V skutočnosti sa kožné záhyby vyskytujú v dôsledku poddajnosti mäkkej delfinovej kože a pozorujú sa tiež u ľudí, ktorí plávajú. Zjednodušený tvar delfína má bod maximálnej hrúbky na 45 % dĺžky tela, a pretože gradienty nepriaznivého tlaku sa vyskytujú iba za týmto bodom, profil „slza“ pomáha obmedziť oddelenie hraničnej vrstvy do zadnej časti tela, čo má za následok menší odpor tlaku. Nie je prekvapením, že tento efektívny profil sa odvtedy využíva v moderných trupoch lodí a ponorkách [31].



**Obr. 14** Efektívny slzný profil delfínov [31].

Všeobecne sa uznáva, že čím hladší povrch, tým menšie trenie produkuje. Vedci však zistili, že pokožka žraloka má štruktúru mikro-drážok, ktorá môže za určitých turbulentných podmienok výrazne znížiť trenie už v roku 1982. Okrem toho, keď bol objavený fenomén inej biologickej morfológie v rôznych mierkach, priniesol tradičný pohľad na hladký povrch o redukcii odporu sa pochybovalo. Stále viac sa prijímali nové biomimetické prístupy k znižovaniu odporu [32].

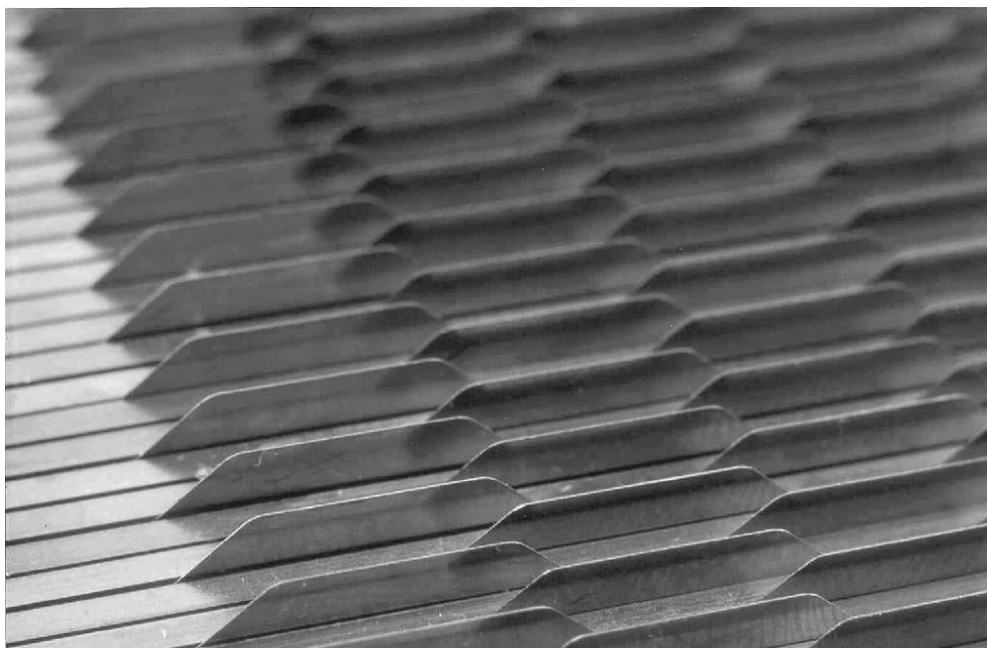
Žraločia koža je zložená z mnohých malých šupín a obrázky SEM (scanning electronic microscopy) žraločej kože a trojrozmerná morfológia v šupine biologickej žraločej kože sú znázornené na obr. 15 je zrejmé, že veľkosť stupnice žraločej kože sa v zásade nachádza v rozmedzí od  $0,1 \text{ mm} \times 0,1 \text{ mm}$  do  $0,2 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm}$  a výška drážky je približne 20 až 30  $\mu\text{m}$ , navyše váhy navzájom vždy prekrávajú [33].



**Obr. 15** SEM žraločej kože [33].

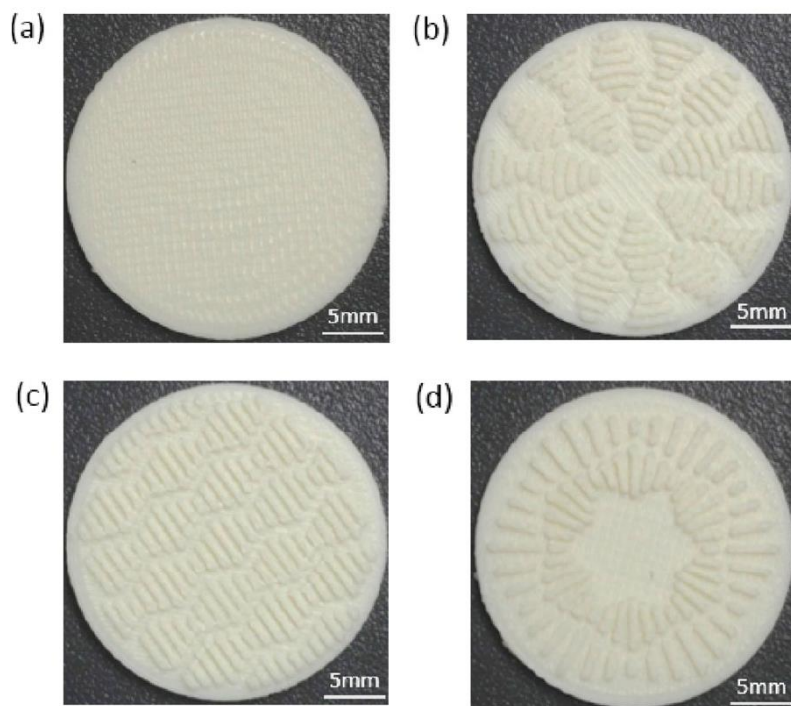
Na povrchu placoidových šupín tiež vyrastajú niektoré veľmi jemné a pravidelne rozmiestnené pozdĺžne drážky (šírka  $\sim 100 \mu\text{m}$ ), ktorých tvar je ako malé rebrá. Tieto krúžky sú usporiadané v smere prúdenia tekutín, čo môže účinne oddialiť výskyt turbulentných vírov a viesť k menšiemu prenosu hybnosti a šmykovému napätiu. Toto zistenie spochybnilo tradičné vedomosti ľudí, že trecia sila je úmerná drsnosti kontaktného povrchu a hladšia pokožka je lepšia na zníženie odporu. K dnešnému dňu existuje niekoľko teórií alebo hypotéz o redukcii odporu žraločej kože. Jednou z nich je vyčnievajúca teória výšky, to znamená, že hroty mikroskopických drážok vyčnievajú viskóznou podvrstvou, aby účinne znížovali intenzitu turbulencie. Okrem toho sa hlavný vír odráža v indukcii generovania odvodených vírov, ktoré môžu tiež znížovať intenzitu turbulencie. Ďalším je útočný uhol plakoidových šupín. Pozdĺžny rez žraločej stupnice nie je rovnobežný so smerom prúdenia vody, čo malo za následok vytváranie mikro kvapiek vody na povrchu svahovej plochy a zníženie viskózneho odporu. Tiež je možné meniť uhol útoku stupnice žraločej kože tak, aby sa prispôbil smer prúdenia kvapaliny, čím sa môže dosiahnuť maximálna účinnosť zníženia odporu. Tretím je hlien na žraločej koži. Pod účinkom tekutiny sa hlien môže vyvíjať v nano-dlhých reťazcoch zasahujúcich do viskóznej podvrstvy, čo môže zvyšovať hĺbku viskóznej podvrstvy, ktorá hrá ako vyrovnávacia vrstva a znižuje turbulentnú intenzitu [34].

Za účelom odhalenia mechanizmu redukcie odporu kože žraloka boli vyvinuté rôzne repliky kože žralokov a geometrie rebier inšpirované žraločou pokožkou, aby sa dosiahlo účinné zníženie odporu. V roku 1985 Berchert a kol. [35] vyvinuli repliku kože žraloka z tvrdého plastu (obr. 16), ktorá môže dosiahnuť zníženie odporu o 3 %.



**Obr. 16** Rebrovaná platňa testovaná Bechertom a kol. [36].

Po rokoch Han a kol. [37] vyrobili relikviu kože žraloka metódou lisovania za tepla, ktorej maximálna účinnosť zníženia odporu môže dosiahnuť 8,25 % a priemerná účinnosť zníženia odporu je 6,91 %. V roku 2014 Wen a kol. [38] uvádza 3D tlačенú pružnú žraločiu kožu, ktorá ukázala zvýšenú rýchlosť plávania so zníženou spotrebou energie. Podľa najnovších výskumov v roku 2018 Domel a kol. vyrobila 3D tlačené fólie zo žraločej kože s tuhými denticlami vloženými do pružného substrátu, aby preskúmala vplyv veľkosti denticlu a rýchlosti toku na zníženie odporu, rok na to Dai a kol. [39] využil 3D tlač akrylonitrilbutadiénstyrénu (ABS) na vytvorenie sériovej orientácie mierok (obr. 17). Povrch podobný žraločej koži s 90 ° orientáciou váh vykazoval najlepší výkon pri znižovaní odporu, z čoho maximálne zníženie viskozity bolo 9 %. Aj keď v posledných desaťročiach došlo k veľkému pokroku, stále existuje veľa záhad spočívajúcich v znižovaní odporu žraloka, ktoré je potrebné preskúmať [33].



**Obr. 17** 3D tlačené povrchy so žraločou pokožkou s rôznou orientáciou mierky: (a) hladké; b) rovnobežný (0 stupňov); (c) zmes (45 stupňov); a (d) kolmý (90 stupňov) [39].

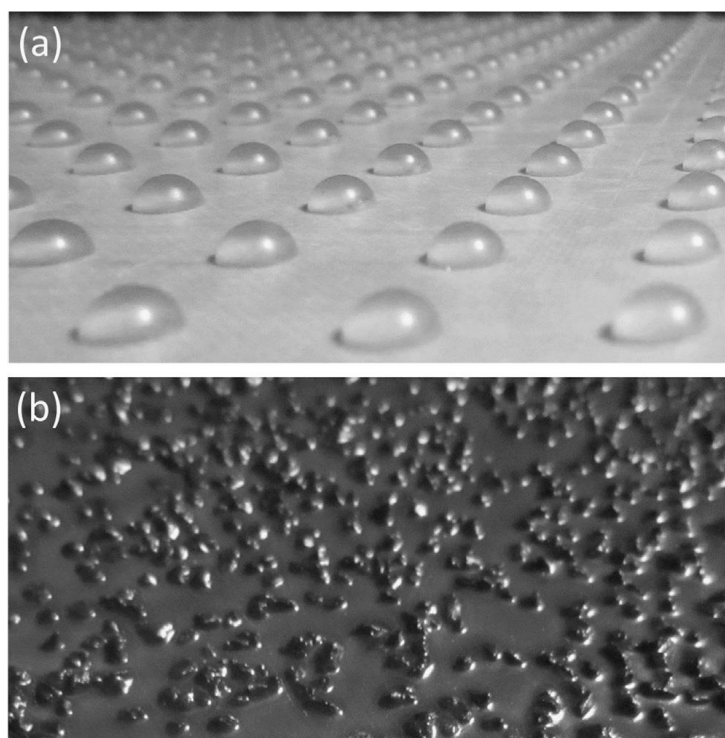
## DRSNÉ POVRCHY

Drsné povrchy majú na podkladový efekt rôzne účinky. Spektrá merané v strede 3 mm sférického načítania drsnosti (obr. 18a) vykazujú iba veľmi mierne zmenené úrovne v porovnaní s hladkou stenou, pričom najvýraznejším rozdielom je zníženie úrovne o niekoľko decibelov pri vysokých frekvenciách. Drsnosť brúsneho papiera (obr. 18b) veľmi efektívne vytvára turbulencie a zvyšuje fluktuácie tlaku steny v celom spektre, najmä pri vysokých frekvenciách a nízkych rýchlostiach [40].

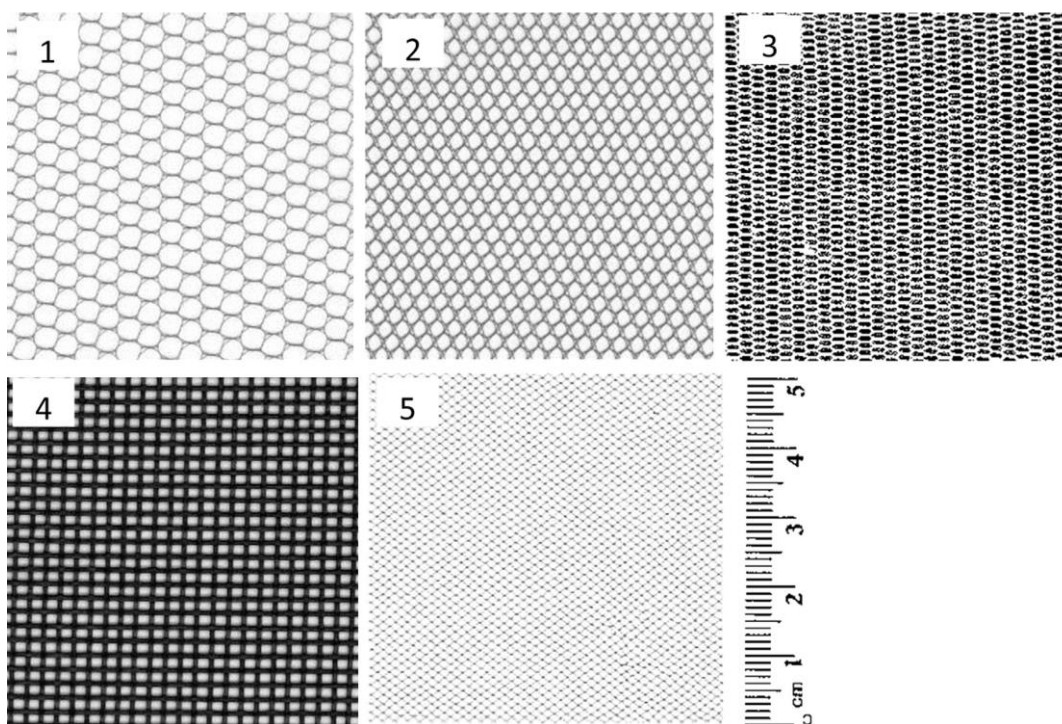
## MATERIÁLOVÉ KRYTINY

Krytina má zmiešaný efekt na zvuk vyžarovaný z drsných povrchov. Pri frekvenciách stredného rozsahu krytiny skutočne znižuje hluk drsnosti. Väčšie redukcie sa pozorujú, keď sa krytina umiestni na brúsny papier v porovnaní s hemisférickým prípadom drsnosti, a najväčší útlm je približne 5 dB v blízkosti 5 kHz pre prípad 60 m/s. Pri vysokých frekvenciách samotný zvuk krytiny zvyšuje vzdialenú hladinu zvuku iba na drsnom povrchu. Zvýšenie hladín zvuku je najmenšie pre drsný povrch brúsneho papiera [40].





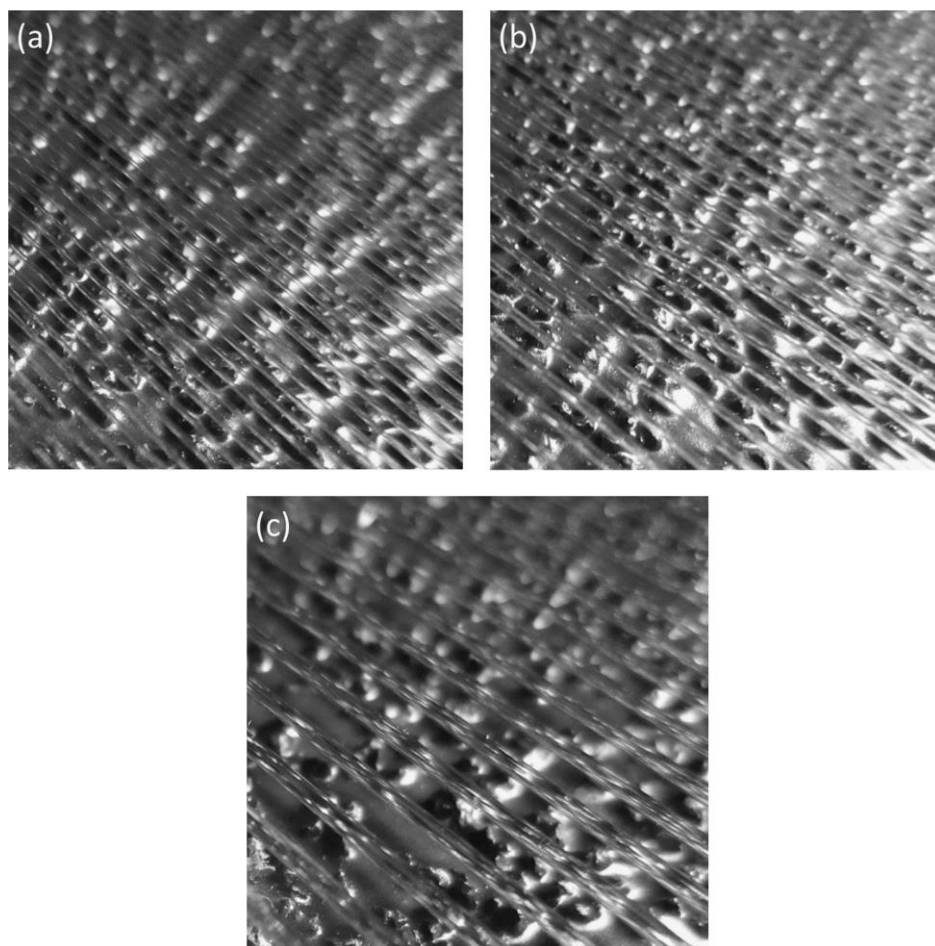
**Obr. 18** a) pologuľovité a b) drsné povrchy  
brúsneho papiera s zrnitosťou 20 [40].



**Obr. 19** Príklady na použitých látok [40].

## JEDNOSMERNÉ KRYTINY

Jednosmerné krytiny sú v podstate látkové krytiny s vláknami iba v smere prúdenia. Výsledky experimentu s baldachýnom tkaniny ukázali, že všeobecne sa zvýšil poľný hluk, pretože tkaniny mali priečne vlákna umiestnené vo väčších uhloch voči smeru prúdenia. Ako taká bola vyvinutá nová hypotéza, ktorá uvádza, že ak by sa tieto priečne vlákna mali odstrániť a ponechať krytinu iba s vláknami orientovanými v prúde dole, potom by sa mohla väčšina vlastného hluku krytiny vylúčiť, zatiaľ čo zrušovacie aspekty krytiny sa mohli zachovať. To viedlo k vývoju jednosmernej krytiny, ktorá má vystužené podpory nití pred a za výstupom drsnosti. Existovala obava, že prítomnosť týchto podpier by podstatne zmenila prietok cez brúsny papier alebo kryt, a tým ovplyvnila akustické správanie týchto predmetov. Pred predložením údajov o účinkoch jednosmerných krytín sú preto poskytnuté výsledky, ktoré odhalia porovnateľne malé účinky podpier nití na oblasť vyžarovaného hluku a povrchového tlaku. Podpory zvýšili úroveň poľa približne o 1–2 dB nad pozadím v celom frekvenčnom spektre. Existuje hypotéza, že väčšina ďalekosiahleho účinku je spôsobená rozptylom hluku trysky zo zakrivenia povrchu podkladu, a nie žiadnym ďalším aerodynamickým zdrojom [40].



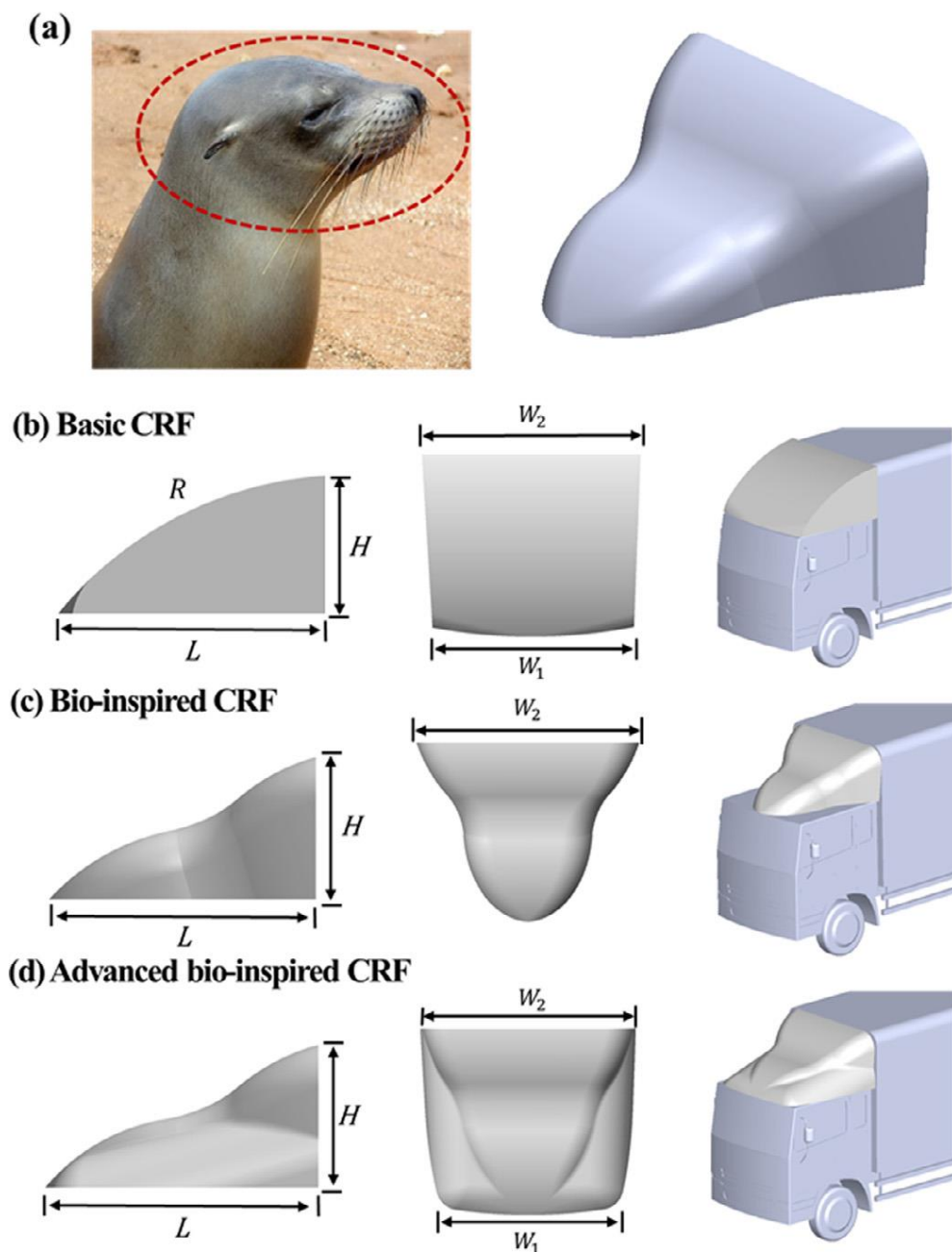
**Obr. 20** Jednosmerné kryty zavesené nad drsnosťou brúsneho papiera:  
(a) kryt 1, (b) kryt 2 a (c) kryt 3 [40].



## 2.6 TVARY ČELA MORSKÝCH LEVOV

Biomimetické CRF (cab-roof fairing, ktorá sa tiež nazýva „deflektor kabíny“) sú inšpirované tvarom čela morských levov a sú určené na zníženie odporu ťažkých vozidiel. Aj keď morské živočíchy plávajú v mori a ťažké vozidlá jazdia v rôznych prostrediach, obe vykazujú podobné hodnoty Reynoldsovo čísla ( $Re = \sim 10^6$ ). 3D tvar morských živočíchov bol prijatý do návrhu nových CRF na zníženie odporu ťažkých vozidiel. Tri rôzne typy CRF (tj. Základné, biologicky inšpirované a pokročilé biologicky inšpirované) boli vyrobené pomocou 3D tlače. Účinky redukcie odporu sa kvantitatívne vyhodnotili pomocou zmenšených modelov veterných tunelov 15-tonových (1:8) a 5-tonových (1:6) ťažkých vozidiel. Aby sa odhalil mechanizmus redukcie odporu, boli charakteristiky toku (napr. Stredné rýchlostné pole a turbulentná kinetická energia, TKE) okolo predného dielu zmenšeného modelu vozidla (1:15) s CRF a bez nich merané pomocou časticová obrazová velocimetria (PIV) a kvantitatívne porovnané. Všetky experimenty sa opakovali s rôznym uhlom vybočenia v rozmedzí  $\beta = 0^\circ - 15^\circ$ , aby sa zistili účinky bočného vetra na zníženie odporu a jazdnú stabilitu [30].

Z týchto experimentov pokročilý biologicky inšpirovaný CRF do značnej miery znížil koeficienty odporu 15-tonových a 5-tonových modelov ťažkých vozidiel o približne 20 %, respektíve 23 %. Zodpovedajúca bočná sila sa navyše znížila približne o 8 % a 9 % pri uhle vybočenia  $\beta = 3^\circ$ . Deficit hybnosti a hodnoty TKE prietoku v blízkosti bočného povrchu vozidiel sa významne znížili inštaláciou biologicky inšpirovaných CRF v porovnaní s CRF bez a so základným CRF. Okrem toho biologicky inšpirované CRF pozoruhodnejšie znížili koeficient odporu a bočnej sily za bočného vetra ako koeficient za predného vetra ( $\beta = 0^\circ$ ). Navrhované biologicky inšpirované CRF ponúkajú ďalšie výhody, napríklad nákladovo efektívnu výrobu a ľahkú montáž na ťažké vozidlá. Účinok navrhovaného CRF na zníženie výrazného odporu sa dosiahol moduláciou vonkajšieho tvaru komerčného modelu CRF. Zistenia tejto štúdie Kim a kol. [30] poskytujú užitočné informácie pre návrh nového zariadenia na reguláciu prietoku predného tela so zníženým aerodynamickým odporom a zvýšenou jazdnou stabilitou v ťažkých vozidlách. Aby ďalej zlepšili redukcii odporu a jazdnú stabilitu, snažia sa v blízkej budúcnosti optimalizovať dizajn navrhovaného biologicky inšpirovaného CRF prostredníctvom systematickej štúdie s rôznymi morfológickými parametrami.



**Obr. 21** a) Vonkajší tvar predného tela morského leva (vľavo, fotografia Sara Yeomans) a model CRF inšpirovaný biotechnológiou inšpirovaný tvarom hlavy morského leva (vpravo). Schematický pohľad z boku a zhora na (b) základné CRF, (c) biologicky inšpirované CRF a (d) pokročilé biologicky inšpirované CRF a príslušné modely ťažkých vozidiel nimi vybavené (vpravo od každého modelu CRF) [30].

### 3 ZHODNOTENIE A VYUŽITEL'NOSŤ

Ako už bolo spomenuté, hluk závisí aj od karosérie vozidla a jeho aerodynamiky vo vnútri aj zvonku vozidla. Je však dôležité uvedomiť si, čo môže spôsobiť tento vnútorný hluk:

- Spätné zrkadlá,
- čelné sklo,
- stierače,
- prúdenie vzduchu okolo dverí a okien,
- deliace hrany,
- odpor vzduchu.

Musíme teda venovať čo najväčšiu pozornosť tomu, kde môžeme dané živočíšné stratégie najefektívnejšie uplatniť, aby sme dosiahli čo najväčšie zníženie hluku.

U vozidiel najlepšie prúdi vzduch okolo kapoty, čelného skla, dverí a okien a strechy. Charakteristické pre tieto povrchy v porovnaní s ostatnými je, že nie sú nijako zvlášť členité, sú takmer úplne hladké, takže okolo nich vzduch prúdi skutočne ľahšie, v porovnaní s ostatnými časťami karosérie. Okrem toho sa medzi telom a laminárne prúdiacim vzduchom nachádza aj hraničná vrstva. Hrúbka tejto hraničnej vrstvy narastá ako sa približuje k zadnej časti vozidla. To spôsobuje, že prúdenie ťažšie kopíruje tvar vozidla a vo väčšom množstve sa začnú vytvárať turbulentné prúdy vzduchu. Ako už bolo spomenuté, je všeobecne uznávané, že čím je povrch hladší, tým má menšie trenie, a tu existuje príležitosť využiť znalosti získané pri skúmaní kože žralokov. Kopírovaním žraločej kože môžeme vytvoriť vonkajšiu vrstvu, ktorá môže účinne oddialiť výskyt turbulentných vírov. Podobný potenciál existuje aj v drsných kritinách, ktoré sú tiež schopné znížiť hluk pri správnom použití. Samozrejme, ktorý z vyššie uvedených testovacích prvkov je najefektívnejší, je možné určiť iba experimentálne, pretože záleží na modeli automobilu a ktoré časti vozidla chceme takýmto krytom zakryť. Táto efektivita závisí ešte aj od toho aké sú podmienky prúdenia vzduchu lebo môžu existovať ďalšie podobné zariadenia pred ním, ktoré tiež uľahčujú prúdenie. Vďaka tomu je možné vytvoriť dokonca niekoľko kombinácií. Podobné riešenie možno vyskúšať pri krytoch spätných zrkadiel. Naopak, je málo pravdepodobné, že by sa podobné zmeny mohli vykonať aj na čelnom skle, hlavne z bezpečnostných dôvodov.

Pri nanášaní povrchov podobných delfinovej koži sa pomocou kľúčových experimentov určuje, ktoré časti povrchu vozidla vyžadujú také zmeny, aby sa uľahčilo prúdenie vzduchu. Je pravdepodobné, že by nebolo schopné ovplyvniť zníženie hluku v rovnakom pomere ako kryt vyrobený podľa kože žraloka.

Existuje tiež potenciál v tom, ako využiť výhody prvkov predstavených krídlami sov, najmä zadnej časti krídiel. Konkrétne pri zadnom spojleru, kde sa laminárne prúdenie oddeľuje od povrchu automobilu. Pri návrhu týchto spojlerov môže hrať dôležitú úlohu tak vhodná vlnová dĺžka zuba, ako aj dĺžka samotných zubov. Veľkosť uhla nárazu môže tiež hrať dôležitú úlohu pri zabezpečovaní správneho dosiahnutia redukcie hluku. To platí aj pre možné použitie u zadných krídiel. S hrubšími krídlami alebo spojlermi je možné medzi zubami vytvoriť menšie drážky, čo tiež môže zvýšiť účinnosť. Podobné riešenie by sa dalo použiť na okraji kapoty smerujúcej k stieračom, čím by stierače zasiahlo rovnomernejšie prúdenie, je však pravdepodobné, že bude mať minimálny účinok. V minulosti už boli pokusy podobné finletovým plotom, s takzvanými generátormi vírov, ako je napríklad model zobrazený na obr. 22, ale v tom čase neboli obzvlášť úspešné [41].



**Obr. 22** Mitsubishi Lancer Evolution 9 MR FQ-400 vybavené vírovými generátormi [42].

Možná kombinácia s plotmi alebo pílením zubov však môže poskytnúť príležitosť pre inú metódu na zníženie hluku. Keďže na predných hranách vozidla je generovaný menší aerodynamický hluk, pri využívaní tejto stratégie je menší potenciál, prípadné alternatívy možno hľadať pri úprave vstupnej hrany strechy.

Na využitie potenciálu hrebeňovej hrany je najlepším riešením umiestniť pred spätné zrkadlo komponent s podobnými vlastnosťami, aby bolo možné úpravou prietoku znížiť aerodynamický šum generovaný zrkadlami.

Porézne povrchy tiež vykazovali vysokú účinnosť pri znižovaní hluku, avšak pri použití u spojlerov resp. zadných krídiel nepriaznivé poveternostné podmienky, prach alebo upchatie pórov hmyzom môžu byť nebezpečnými faktormi. To môže viesť k tomu, že už po chvíli stratia schopnosť znižovať hluk. Pri rôznych metódach čistenia by sa tomu dalo vyhnúť, mohlo by to však spochybniť ekonomické náklady na vývoj a údržbu tejto techniky.

Dizajn podobný hlave morského leva je možné najlepšie využiť v oblasti medzi kapotou a strechou, čím sa výrazne mení prúdenie vzduchu, čo môže mať za následok menšie prúdenie aj do spätných zrkadiel, čím sa zníži hluk, ktorý vytvárajú. Pri tomto riešení je však potrebné venovať pozornosť aj návrhu, aby sa znížil hluk generovaný niektorými prvkami, medzitým neboli kompromitované ďalšie súčiastky, čo by viedlo k celkovému zvýšeniu hluku.

Celkovo povedané v niektorých stratégiách existuje značný potenciál, je však potrebný ďalší výskum a experimenty, aby sa určil ich rozsah. Okrem toho je dôležité dať pozor pri zameraní na zníženie hluku, aby sa nezvýšil odpor vozidla, čím sa zvýši spotreba paliva, a aby sa neznížila ani jeho stabilita a tak bezpečnosť konštrukcie. Na základe nich možno vytvoriť návrhy na dizajn a súčiastky, ktoré sú schopné vnímateľného zníženia hluku. Samozrejme, čím viac štúdií sa zaoberá týmito technikami, tým viac prototypov sa vyrába, tým presnejšie bude viditeľné, ktoré vlastnosti budú fungovať najlepšie a účinnosť každej repliky a prvku sa zvýši. Ich kombináciou môžeme dosiahnuť ešte výraznejších redukcí. To môže byť obzvlášť užitočné v čoraz viac sa rozvíjajúcom priemysle elektrických vozidiel, kde jeden z hlavných

zdrojov hluku, pohonná jednotka, produkuje oveľa menej hluku ako bežné automobily so spaľovacím motorom.

## ZÁVER

Účelom tejto práce bolo, aby zhrnul informácie o biologických stratégiách živočíchov, ktoré by sme mohli použiť pre zníženie hluku pri navrhovaní vozidiel. Táto práca tiež poskytuje prehľad o vývoji výskumu a experimentov jednotlivých technológií, ako aj o ich súčasnej situácii.

Bolo potrebné objasniť, čo je hluk a prečo je pre nás také dôležité sa touto problematikou zaoberať. Práve to nás motivuje, aby sme dosiahli, aby cestovanie bolo nielen že menej rušivé pre ľudí, ale poskytoval oveľa lepší zážitok s ešte väčším komfortom pre jazdca, spolujazdca.

Pokiaľ ide o techniky prezentované v práci, dá sa povedať, že v každej z nich existuje značný potenciál, je však potrebný ďalší výskum a experimenty, aby sa určil ich rozsah účinnosti. Tieto stratégie však ukrývajú taký potenciál, aby sa oplatilo ich vyskúšať a zaoberať sa s nimi. Avšak vzhľadom na rešeršný charakter bakalárskej práce, a pre nedostatok primeraného vybavenia, boli príležitosti v tejto oblasti obmedzené. Z toho vyplýva, že nie je možné vydať spoľahlivé stanovisko o tom, ako dobre to funguje alebo či to funguje vôbec. Možno vyvodiť iba teoretické závery.

Okrem toho, je dôležité si dávať pozor pri zameraní na zníženie hluku, aby sa nezvýšil odpor vozidla, čím sa zvýši spotreba paliva, aby sa neznížila ani jeho stabilita a tak bezpečnosť konštrukcie. Na základe nich možno vytvoriť návrhy na dizajn a súčiastky, ktoré sú schopné vnímateľného zníženia hluku. Samozrejme, čím viac štúdií sa zaoberá týmito technikami, tým viac prototypov sa vyrába, tým presnejšie bude viditeľné, ktoré vlastnosti budú fungovať najlepšie. Aj účinnosť každej repliky a prvku sa zvýši. Z konštruktívneho hľadiska, ich prípadnou kombináciou môžeme dosiahnuť ešte výraznejších redukcii.

To môže byť obzvlášť užitočné v čoraz viac sa rozvíjajúcom priemysle elektrických vozidiel, kde jeden z hlavných zdrojov hluku, pohonná jednotka, produkuje oveľa menej hluku ako bežné automobily so spaľovacím motorom. Keby sme dokázali minimalizovať aj hluk vzduchu prúdiaceho okolo karosérie, posunulo by to návrh elektromobilov na vyššiu úroveň. Tu by sme už hľadali riešenia, ktoré namiesto hluku môžu ešte signalizovať blížiaci vozidlá, aby sa zabránilo nehodám a udržala sa bezpečnosť premávky.

Štúdie metód na zníženie hluku automobilu je skutočne rozsiahlou témou. Aj keď sme v tejto štúdii skúmali iba zvieracie stratégie, nemožno ho však v celku analyzovať v rámci rozsahu bakalárskej práce. Práca však môže slúžiť ako základ pre ďalšie výskumy a experimenty na túto tému.

## POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] *Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu* [online]. [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: [http://www.anatomie-varhan.cz/tevarhany/anatomie/pistaly\\_akustika.htm](http://www.anatomie-varhan.cz/tevarhany/anatomie/pistaly_akustika.htm)
- [2] SCHAUER, Pavel. *Vybrané statě z akustiky* [online]. 2008 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: [http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka\\_schauer/vybrane\\_state\\_z\\_akustiky.pdf](http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf)
- [3] KLEINER, Mendel. *Acoustics and Audio Technology, Third Edition*. 3rd ed. J. Ross Publishing, 2011. ISBN 9781604277241.
- [4] ROSSING, Thomas a Neville FLETCHER. *Principles of vibration and sound*. New York: Springer-Verlag, 1995. ISBN 0387943048.
- [5] JACOBSEN, Finn, Torben POULSEN, Jens RINDEL, Anders GADE a Mogens OHLRICH. *Fundamentals of acoustics and noise control*. 2008. ISBN 9781118636176.
- [6] *Noise and vibration control engineering: principles and applications*. 2nd ed. Editor István L. VÉR, editor Leo L. BERANEK. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 1-471-44942-3.
- [7] Co je akustický výkon a akustický tlak?. *DAIKIN* [online]. [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: [https://www.daikin.cz/cs\\_cz/casto-kladene-otazky/co-je-akusticky-vykon-akusticky-tlak.html](https://www.daikin.cz/cs_cz/casto-kladene-otazky/co-je-akusticky-vykon-akusticky-tlak.html)
- [8] DE SILVA, Clarence W. *Vibration and shock Handbook*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005. ISBN isbn0-8493-1580-8.
- [9] NORTON, M. P. *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*. Cambridge [England]: Cambridge University Press, 1989. ISBN isbn0-521-34148-5.
- [10] NĚMEČEK, Pavel. *Akustická diagnostika* [online]. [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1848>
- [11] Tire Pavement Noise: Strategic Planning Workshop - 2004. <https://highways.dot.gov/> [online]. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: [https://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/tire\\_pavement\\_noise/fhwa\\_policy/tpnwk\\_s2004/wrkshop01.cfm](https://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/tire_pavement_noise/fhwa_policy/tpnwk_s2004/wrkshop01.cfm)
- [12] GOTTVALDOVÁ, Jana. Automobilový hluk. *SILNICE ŽELEZNICE* [online]. 2011 [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/automobilovy-hluk/>

- [13] WANG, Yong, Kun ZHAO, Lu XIANG-YU, Song YU-BAO a Gareth BENNETT. Bio-Inspired Aerodynamic Noise Control: A Bibliographic Review. *Applied Sciences* [online]. Basel: MDPI AG, 2019, **9**(11) [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: doi:10.3390/app9112224
- [14] CHEN, Kun, Qingping LIU, Genghua LIAO, Ying YANG, Luquan REN, Hongxiu YANG a Xin CHEN. The Sound Suppression Characteristics of Wing Feather of Owl (*Bubo bubo*). *Journal of bionics engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2012, **9**(2), 192-199 [cit. 2021-03-13]. ISSN 1672-6529. Dostupné z: doi:10.1016/S1672-6529(11)60109-1
- [15] GRAHAM, R.R. The silent flight of owls. *The Aeronautical Journal* [online]. 1934, **38**(286) [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: doi:10.1017/S0368393100109915
- [16] KLÄN, Stephan, Thomas BACHMANN, Michael KLAAS, Hermann WAGNER a Wolfgang SCHRÖDER. Experimental analysis of the flow field over a novel owl based airfoil. *Experiments in Fluids* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, **46**(5), 975-989 [cit. 2021-03-17]. ISSN 0723-4864. Dostupné z: doi:10.1007/s00348-008-0600-7
- [17] HERSH, A., P. SODERMAN a R. HAYDEN. Acoustic Investigation of Leading-Edge Serrations on Lifting Surfaces. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 1971, **50**(1), 121-121 [cit. 2021-03-17]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1977537
- [18] HANSEN, K, R KELSO a C DOOLAN. REDUCTION OF FLOW INDUCED AIRFOIL TONAL NOISE USING LEADING EDGE SINUSOIDAL MODIFICATIONS. *Acoustics Australia* [online]. SPRINGER SINGAPORE PTE LTD, 2012, **40**(3), 172-177 [cit. 2021-03-23]. ISSN 0814-6039.
- [19] ITO, Shinichiro. Aerodynamic Influence of Leading-Edge Serrations on an Airfoil in a Low Reynolds Number - A Study of an Owl Wing with Leading Edge Serrations -. *Journal of Biomechanical Science and Engineering* [online]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2009, **4**(1), 117-123 [cit. 2021-03-17]. ISSN 1880-9863. Dostupné z: doi:10.1299/jbse.4.117
- [20] NARAYANAN, S., P. CHAITANYA, S. HAERI, P. JOSEPH, J. KIM a C. POLACSEK. Airfoil noise reductions through leading edge serrations. *Physics of Fluids* [online]. AIP Publishing LLC, 2015, **27**(2) [cit. 2021-03-23]. ISSN 1070-6631. Dostupné z: doi:10.1063/1.4907798
- [21] GEYER, Thomas, Vanessa CLAUS, Philipp HALL a Ennes SARRADJ. Silent owl flight: The effect of the leading edge comb. *International journal of aeroacoustics* [online]. London, England: SAGE Publications, 2017, **16**(3), 115-134 [cit. 2021-03-17]. ISSN 1475-472X. Dostupné z: doi:10.1177/1475472X17706131



- [22] HOWE, M.S. Aerodynamic noise of a serrated trailing edge. *Journal of fluids and structures* [online]. Elsevier Ltd, 1991, **5**(1), 33-45 [cit. 2021-03-17]. ISSN 0889-9746. Dostupné z: doi:10.1016/0889-9746(91)80010-B
- [23] GRUBER, Mathieu, Mahdi AZARPEYVAND a Phillip JOSEPH. *Airfoil Trailing Edge Noise Reduction by the Introduction of Sawtooth and Slitted Trailing Edge Geometries* [online]. 2010 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/164257>
- [24] CHONG, Tze, Elisa DUBOIS a Alexandros VATHYLAKIS. *Aeroacoustic and Flow Assessment of the Poro-Serrated Trailing Edges* [online]. 2016 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.2514/6.2016-2833>
- [25] BODLING, Andrew a Anupam SHARMA. Numerical investigation of noise reduction mechanisms in a bio-inspired airfoil. *Journal of sound and vibration* [online]. Elsevier Ltd, 2019, **453**, 314-327 [cit. 2021-03-13]. ISSN 0022-460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2019.02.004
- [26] CLARK, Ian, William DEVENPORT, Justin JAWORSKI, Conor DALY, Nigel PEAKE a Stewart GLEGG. *The Noise Generating and Suppressing Characteristics of Bio-Inspired Rough Surfaces* [online]. 2014 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.2514/6.2014-2911>
- [27] SUEKI, Takeshi, Mitsuru IKEDA a Takehisa TAKAISHI. Aerodynamic Noise Reduction using Porous Materials and their Application to High-speed Pantographs. *Quarterly Report of RTRI* [online]. Tokyo: Japan Science and Technology Agency, 2009, **50**(1), 26 [cit. 2021-03-23]. ISSN 00339008. Dostupné z: doi:10.2219/rtriqr.50.26
- [28] JAWORSKI, Jw a N PEAKE. Aerodynamic noise from a poroelastic edge with implications for the silent flight of owls. *Journal Of Fluid Mechanics* [online]. CAMBRIDGE UNIV PRESS, 2013, **723**, 456-479 [cit. 2021-03-23]. ISSN 0022-1120. Dostupné z: doi:10.1017/jfm.2013.139
- [29] HERR, Michaela, Karl-Stephane ROSSIGNOL, Jan DELFS, Nicolas LIPPITZ a Michael MÖßNER. *Specifcation of Porous Materials for Low-Noise Trailing-Edge Applications* [online]. 2014 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.2514/6.2014-3041>
- [30] KIM, Jeong, Jiwoo HONG a Sang LEE. Bio-inspired cab-roof fairing of heavy vehicles for enhancing drag reduction and driving stability. *International journal of mechanical sciences* [online]. Elsevier Ltd, 2017, **131-132**, 868-879 [cit. 2021-04-09]. ISSN 0020-7403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2017.08.010

- [31] BIO-MIMETIC DRAG REDUCTION – PART 3: MORPHING. *FUGAHUMANA – HUMAN FLIGHT* [online]. 2012 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://fugahumana.wordpress.com/2012/04/05/bio-mimetic-drag-reduction-part-3-morphing/>
- [32] LIU, Guijie, Zichao YUAN, Zhaozun QIU, Shuwen FENG, Yingchun XIE, Dingxin LENG a Xiaojie TIAN. A brief review of bio-inspired surface technology and application toward underwater drag reduction. *Ocean engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2020, **199** [cit. 2021-04-09]. ISSN 0029-8018. Dostupné z: doi:10.1016/j.oceaneng.2020.106962
- [33] LUO, Yuehao, Lu YUAN, Jianhua LI a Jianshe WANG. Boundary layer drag reduction research hypotheses derived from bio-inspired surface and recent advanced applications. *Micron (Oxford, England: 1993)* [online]. Elsevier Ltd, 2015, **79**, 59-73 [cit. 2021-04-09]. ISSN 0968-4328. Dostupné z: doi:10.1016/j.micron.2015.07.006
- [34] YU, Cunming, Mengfei LIU, Chunhui ZHANG, Hao YAN, Minghui ZHANG, Qingshan WU, Mingjie LIU a Lei JIANG. Bio-inspired drag reduction: From nature organisms to artificial functional surfaces. *Giant* [online]. Elsevier, 2020, **2**, 100017 [cit. 2021-04-09]. ISSN 2666-5425. Dostupné z: <https://doaj.org/article/7245f556485c43fdaf755d7f6bce0f44>
- [35] BECHERT, D.W. a W.E. REIF. On the drag reduction of the shark skin. *AIAA Shear Flow Control Conference* [online]. 1985 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: doi:10.2514/6.1985-546
- [36] BECHERT, D., M. BRUSE, W. HAGE a R. MEYER. Fluid Mechanics of Biological Surfaces and their Technological Application. *Naturwissenschaften* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2000, **87**(4), 157-171 [cit. 2021-04-10]. ISSN 0028-1042. Dostupné z: doi:10.1007/s001140050696
- [37] HAN, Xin, Deyuan ZHANG, Xiang LI a Yuanyue LI. Bio-replicated forming of the biomimetic drag-reducing surfaces *in large area based* on shark skin. *Science Bulletin* [online]. 2008, 53(10), 1587-1592 [cit. 2021-04-09]. ISSN 2095-9273. Dostupné z: doi:10.1007/s11434-008-0219-3
- [38] WEN, Li, James WEAVERM a George LAUDER. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. *Journal of Experimental Biology* [online]. Portland Press Ltd. (UK), 2014, 217(10), 1656 [cit. 2021-04-09]. ISSN 0022-0949. Dostupné z: doi:10.1242/jeb.097097
- [39] DAI, Wei, Masfer ALKAHTANI, Philip HEMMER a Hong LIANG. Drag-reduction of 3D printed shark-skin-like surfaces. *Friction* [online]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019, 7(6), 603-612 [cit. 2021-04-09]. ISSN 2223-7690. Dostupné z: doi:10.1007/s40544-018-0246-2

- [40] CLARK, Ian, Conor DALY, William DEVENPORT, W. ALEXANDER, Nigel PEAKE, Justin JAWORSKI a Stewart GLEGG. Bio-inspired canopies for the reduction of roughness noise. *Journal of sound and vibration* [online]. Elsevier Ltd, 2016, **385**, 33-54 [cit. 2021-03-13]. ISSN 0022-460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2016.08.027
- [41] KOIKE, Masaru, Tsunehisa NAGAYOSHI a Naoki HAMAMOTO. Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators [online]. Mitsubishi motors technical review, 2004, 16, 11-16 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.evolutionm.net/forums/attachments/evo-general/204448d1365210271-vortex-generator-engineering-article-research-aerodynamic-drag-reduction-vortex-generators.pdf>
- [42] WONG, Kai Yi. Does a vortex generator really help generate downforce on a car?. Torque [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.torque.com.sg/features/does-vortex-generator-really-help-generate-downforce/>

## ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

$c$	[m/s]	Rýchlosť šírenia zvuku vo vzduchu
$c_0$	[m/s]	Referenčná hodnota rýchlosti šírenia zvuku vo vzduchu
$f$	[Hz]	Frekvencia
$h$	[m]	Amplitúda
$I$	[W/m <sup>2</sup> ]	Austická intenzita
$I_0$	[W/m <sup>2</sup> ]	Referenčná hodnota akustickej intenzity
$I_{max}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Maximálna akustická intenzita
$K$	[-]	Vlnové číslo
$L_I$	[dB]	Hladina akustickej intenzity
$L_P$	[dB]	Hladina akustického tlaku
$\Delta PWL$	[dB]	Rozdiel hladiny akustického výkonu
$p$	[Pa]	Zvukový tlak
$\bar{p}$	[Pa]	Príslušný stredný kvadrát príslušného tlaku
$p_{re}$	[Pa]	Referenčný tlak
$p_{rms}$	[Pa]	Kvadratický priemer akustického tlaku
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$\Delta SPL$	[dB]	Rozdiel hladiny akustického tlaku
$St_0$	[-]	Strouhalovo číslo
$t$	[s]	Čas
$U$	[m/s]	Priemerná rýchlosť prúdenia
$U_0$	[m/s]	Konštantná rýchlosť prúdenia
$\beta$	[°]	Úhol vybočenia
$\delta$	[m]	Hrúbka medznej vrstvy
$\lambda$	[m]	Vlnová dĺžka
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota vzduchu
$rms$		Root mean square - Kvadratický priemer
$CRF$		Cab-roof fairing - Deflektor kabíny
$PIV$		Particle image velocimetry - Integrálna laserová anemometria
$SEM$		Scanning electronic microscope - Skenovací elektrónový mikroskop
$TKE$		Turbulence kinetic energy - Turbulentná kinetická energia